

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

Факультет  
будівництва, транспорту та  
енергетики

Кафедра електротехнічних  
систем та енергетичного  
менеджменту

## **АВТОМАТИЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

*методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт  
для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі  
спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка"*

Кропивницький  
2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

Факультет  
будівництва, транспорту та  
енергетики

Кафедра електротехнічних  
систем та енергетичного  
менеджменту

**АВТОМАТИЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ТА  
УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

*методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт  
для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі  
спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка"*

Затверджено  
на засіданні кафедри  
електротехнічних систем та  
енергетичного менеджменту  
Протокол № 13 від 13.02.2023 р.

Кропивницький 2023

Автоматизація контролю та управління якістю електроенергії: методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" / [уклад.: П. Г. Плешков, В. П. Солдатенко, І. В. Савеленко, С. П. Плешков, В. В. Зінзура], Центральноукр. нац. техн. ун-т. – Кропивницький: ЦНТУ, 2023 – 86 с.

Укладачі:

П. Г. Плешков – канд. техн. наук, проф., завідувач кафедри ЕТС та ЕМ  
В. П. Солдатенко – канд. техн. наук, доцент кафедри ЕТС та ЕМ  
І. В. Савеленко – канд. техн. наук, доцент кафедри ЕТС та ЕМ  
С. П. Плешков – канд. техн. наук, доцент кафедри АВП  
В. В. Зінзура – канд. техн. наук, доцент кафедри ЕТС та ЕМ

Рецензент: С. І. Осадчий – д.т.н., професор кафедри конструкції повітряних суден, авіадвигунів та підтримання льотної придатності. ДЛАУ

© Плешков П. Г., Солдатенко В. П.,  
Савеленко І. В., Плешков С. П.  
Зінзура В. В. 2023  
© Центральноукраїнський  
національний технічний університет,  
2023

## ЗМІСТ

<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1.</b> Графоаналітичний метод спектрального аналізу осцилограм напруги .....	4
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2.</b> Дослідження режимів роботи систем електропостачання з джерелами вищих гармонік.....	9
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3.</b> Дослідження режимів роботи системи електропостачання з фільтрокомпенсуючими пристроями .....	19
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4.</b> Приладний контроль відхилення напруги в мережі.....	31
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5.</b> Приладний контроль несиметрії напруг в мережі .....	39
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6.</b> Приладний контроль несинусоїдальності напруги в мережі .....	48
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7.</b> Приладний контроль відхилення частоти в мережі .....	56
<b>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8.</b> Вимірювання показників якості електричної енергії з допомогою цифрового мультиметру DMK-32 .....	60
<b>СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ</b> .....	68
<b>ДОДАТОК А.</b> Опис програми «Fourier» .....	69
<b>ДОДАТОК Б.</b> Опис програми «FKU» .....	72
<b>ДОДАТОК В.</b> Технічні дані ФКП .....	77
<b>ДОДАТОК Г.</b> Опис цифрового частотоміра та програми обробки даних «Freg» .....	78
<b>ДОДАТОК Д.</b> Методика проведення вимірювань та аналізу результатів .....	81

# Лабораторна робота № 1

## ГРАФОАНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ОСЦИЛОГРАМ НАПРУГИ

**Мета роботи:** ознайомитися з графоаналітичним методом аналізу осцилограм напруги та набути практичні навички обчислення коефіцієнту несинусоїдальності напруги, діючих значень вищих гармонік напруги за допомогою перетворення Фур'є.

### Теоретичні відомості

В основі графоаналітичного аналізу покладене те, що будь-яка періодична функція, яка задовольняє умовам Діріхле, може бути представлена у вигляді тригонометричного ряду Фур'є:

$$f(x) = A_0 + \sum_{v=1}^{\infty} A_v \sin(vx) + \sum_{v=1}^{\infty} B_v \cos(vx), \quad (1.1)$$

де  $A_0$  – постійна складова ряду Фур'є:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx, \quad (1.2)$$

$A_v$  – коефіцієнт Фур'є при синусних складових:

$$A_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(vx) dx, \quad (1.3)$$

$B_v$  – коефіцієнт Фур'є при косинусних складових:

$$B_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(vx) dx. \quad (1.4)$$

Графоаналітичний метод визначення коефіцієнтів ряду Фур'є заснований на заміні визначеного інтегралу скінченною сумою складових. З цією метою період  $2\pi$  досліджуваної функції  $f(x)$ , розбивають на  $n$  рівних частин:

$$\Delta X = \frac{2\pi}{n}, \quad (1.5)$$

1. З урахуванням (1.5) постійна складова визначається за формулою:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \sum_{p=1}^n f_p(x) \frac{2\pi}{n} \quad (1.6)$$

або

$$A_0 = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n f_p(x), \quad (1.7)$$

де  $p$  – індекс (приймає значення від 1 до  $n$ );

$f_p(x)$  – значення функції  $f(x)$  при значенні  $x$ :

$$x = p\Delta X. \quad (1.8)$$

2. Амплітуда синусної складової  $v$ -ї гармоніки (1.3) ряду Фур'є з урахуванням (1.5) набуде вигляду:

$$A_v = \frac{2}{n} \sum_{p=1}^n f_p(x) \sin_p vx, \quad (1.9)$$

де  $\sin_p vx$  – значення функції  $\sin vx$  при  $x = p\Delta X$ .

3. Амплітуда косинусної складової  $v$ -ї гармоніки (1.4) ряду Фур'є з урахуванням (1.5) набуде вигляду:

$$B_v = \frac{2}{n} \sum_{p=1}^n f_p(x) \cos_p vx \quad (1.10)$$

де  $\cos_p vx$  – значення функції  $\cos vx$  при  $x = p\Delta X$ .

4. Амплітуда  $v$ -ї гармоніки напруги:

$$U_v = \sqrt{A_v^2 + B_v^2}. \quad (1.11)$$

5. Початкові фази гармонік визначають з виразів:

$$\operatorname{tg} \alpha_v = \frac{A_v}{B_v}, \quad (1.12)$$

$$\alpha_v = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg} \alpha_v), \quad (1.13)$$

де  $\alpha_v$  приймає значення від 0 до  $\pi$ .

6. Діюче значення гармоніки:

$$U_{vd} = \frac{U_v}{\sqrt{2}}. \quad (1.14)$$

7. Діюче значення вищих гармонік:

$$U = \sqrt{U_{2д}^2 + U_{3д}^2 + \dots + U_{vd}^2}. \quad (1.15)$$

8. Коефіцієнт несинусоїдальності:

$$K_{нс} = \frac{\sqrt{U_{2д}^2 + U_{3д}^2 + \dots + U_{vd}^2}}{U_{1д}}. \quad (1.16)$$

## Хід роботи

1. Отримати індивідуальне завдання, яке повинно містити:

- осцилограму напруги;
- кількість інтервалів розбиття  $n$  ;
- значення порядку найбільшої гармоніки, що враховується при розрахунку (максимальне значення найбільшої гармоніки може бути знайдено за формулою  $\nu_{\max} = n/2$ ).

2. Провести розрахунок величин (формули 1.8 – 1.16). Результати розрахунків оформити у вигляді табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Результати графоаналітичного аналізу осцилограми напруги

$\nu$	$A_\nu, B$	$B_\nu, B$	$U_{\text{vm}}, B$	$\text{tg}\alpha_\nu$	$\alpha_\nu, ^\circ$	$U_{\text{vd}}, B$
1						
2						
...						
$\nu_{\max}$						

3. Перевірити правильність розрахунку за допомогою програми «Fourier». Описання програми та порядок роботи з нею наведені в Додатку А.

## Звіт повинен містити

1. Теоретичні відомості
2. Вихідні дані (індивідуальне завдання) кожного члена бригади.
3. Результати графоаналітичного аналізу осцилограми напруги, зведені в табл. 1.1., результати розрахунку діючого значення вищих гармонік та коефіцієнту несинусоїдальності напруги.
4. Лінійний спектр вищих гармонік (результати розрахунку на ПК в програмі «Fourier»).
5. Висновки.

## Контрольні запитання

1. Що таке вищі гармоніки?
2. Причини виникнення вищих гармонік струму та напруги.

3. Джерела виникнення вищих гармонік струму та напруги (при генерації, передачі та споживанні електричної енергії).

4. В чому проявляється негативний вплив вищих гармонік на силове електрообладнання та на установки системи релейного захисту, автоматики, телемеханіки та зв'язку.

5. Які величини, що характеризують несинусоїдальність напруги, нормуються згідно ДСТУ EN 50160:2014, які їх допустимі та граничні значення?

6. Суть графоаналітичного аналізу осцилограм напруги. Порядок розрахунку.

7. Перерахувати умови Діріхле. Навести приклади функцій, які задовольняють і які не задовольняють умовам Діріхле.

## Лабораторна робота № 2

### ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ДЖЕРЕЛАМИ ВИЩИХ ГАРМОНІК

**Мета роботи:** набути практичних навичок розрахунку параметрів системи електропостачання для визначення рівнів вищих гармонік.

#### Теоретичні відомості

Причиною появи вищих гармонік струму і напруги в системах електропостачання промислових підприємств є наявність нелінійних навантажень.

На сучасних промислових підприємствах значне розповсюдження отримали різноманітні перетворювачі, що містять елементи силової електроніки (діоди, тиристори, транзистори). Дані установки є одним з основних джерел вищих гармонік. Найбільш розповсюдженими є трифазні мостові схеми вентильних перетворювачів, перетворювачі частоти. Також до джерел вищих гармонік слід віднести дугові сталеплавильні печі, зварювальні апарати, газорозрядні лампи.

Нелінійні навантаження спотворюють синусоїдальність форми кривої струму, який, протікаючи по поздовжнім елементам системи електропостачання викликає спади напруги, що містять вищі гармоніки. В результаті, згідно другого закону Кірхгофа, спотворюється і форма кривої напруги на шинах електроприймачів.

Наявність вищих гармонік в нарузі живлення негативно впливає на роботу електрообладнання, викликає додатковий нагрів ізоляції, неправильне спрацювання систем телемеханіки, релейного захисту і автоматики.

Розрахунок вищих гармонік струму і напруги в промислових електричних мережах проводиться на основі лінійних схем заміщення, справедливих окремо для кожної гармоніки.

На рис. 2.1 показана принципова схема системи електропостачання промислового підприємства (СЕП), в якій джерелом вищих гармонік є група тиристорних перетворювачів частоти – ТПЧ-800.

На рис. 2.2 наведена схема заміщення даної СЕЕП, а на рис. 2.3 – спрощена схема заміщення СЕП.

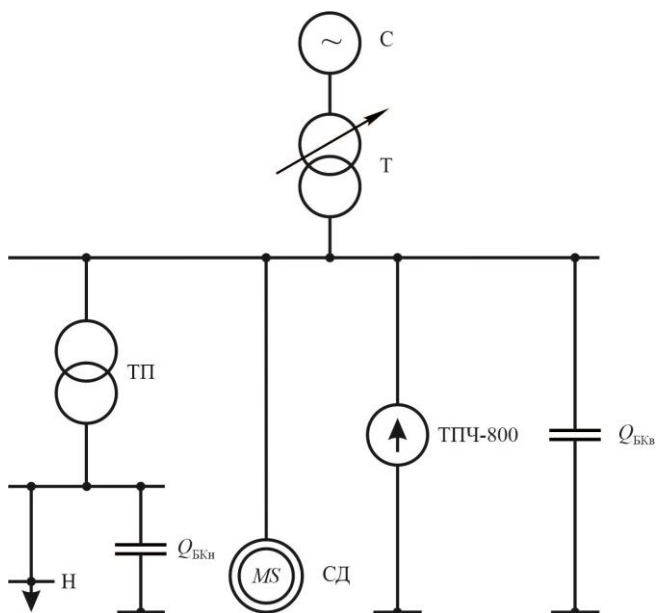


Рис. 2.1. Принципова схема СЕП

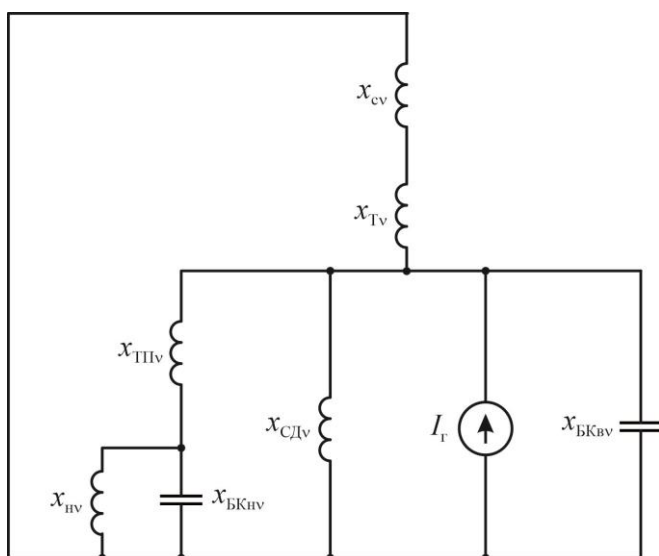


Рис. 2.2. Схема заміщення СЕП

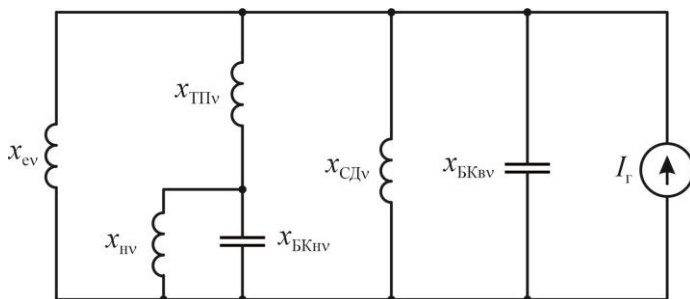


Рис. 2.3. Спрощена схема заміщення СЕС

На рис. 2.3:

$$x_{cv} = x_{cv} + x_{Тv} . \quad (2.1)$$

Значення опорів окремих елементів системи електропостачання визначаються згідно формул, приведених в табл. 2.1.

Нелінійні навантаження, як правило, враховуються струмами вищих гармонік, які визначаються по відповідним виразам. В даній лабораторній роботі в якості джерела вищих гармонік розглядається тиристорний перетворювач частоти ТПЧ-800. Порядок (номера) вищих гармонік струмів, що генеруються ТПЧ визначається згідно з виразом:

$$v = kp \pm 1, \quad (2.2)$$

де  $p$  – фазність перетворювача;

$k$  – ряд натуральних чисел: 1; 2; 3...

Для перетворювача, у якого  $p = 6$ ,  $v = 5; 7; 11; 13; 17; 19...$

В наближених розрахунках рівнів вищих гармонік напруги і струму в системі електропостачання, що містить 6-фазний перетворювач, можна обмежитись врахуванням 5, 7, 11, 13 гармонік.

Таблиця 2.1 – Формули для визначення опору  $v$ -ї гармоніки, Ом

Елемент схеми	Номинальна напруга, кВ	
	6	10
Енергосистема	$x_{\text{сист.}v} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{к.з.}}} v$	$x_{\text{сист.}v} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{к.з.}}} v$
Двохобмотковий трансформатор зв'язку з енергосистемою, потужністю $S_{\text{тр}}$ , МВА, $u_{\text{к}} = 10,5\%$	$x_{\text{тр.}v} = \frac{4}{S_{\text{тр}}} v$	$x_{\text{тр.}v} = \frac{11}{S_{\text{тр}}} v$
Реактор	$x_{\text{р.}v} = x_{\text{р}} v$	$x_{\text{р.}v} = x_{\text{р}} v$
Навантажений трансформатор цехової підстанції, потужністю $S_{\text{тп}}$ , МВА, ( $K_3 = 0,75$ )	$x_{\text{тп.}v} = \frac{12}{S_{\text{тп}}} v$	$x_{\text{тп.}v} = \frac{34}{S_{\text{тп}}} v$
Синхронний (асинхронний) двигун, потужністю $S_{\text{дв}}$ , МВА	$x_{\text{дв.}v} = \frac{6}{S_{\text{дв}}} v$	$x_{\text{дв.}v} = \frac{17}{S_{\text{дв}}} v$
Батарея конденсаторів, потужністю $Q_{\text{бк}}$ , Мвар	$x_{\text{бк.}v} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{Q_{\text{бк}}} \frac{1}{v}$	$x_{\text{бк.}v} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{Q_{\text{бк}}} \frac{1}{v}$
Лінійне навантаження сумарною встановленою потужністю двигунів $S_{\text{дв}}$ , МВА, і цехових підстанцій $S_{\text{тп}}$ , МВА	$x_{\text{н.}v} = \frac{12}{S_{\text{тп}} + 2S_{\text{дв}}} v$	$x_{\text{н.}v} = \frac{34}{S_{\text{тп}} + 2S_{\text{дв}}} v$

Максимальні значення рівнів вищих гармонік струму для групи однакових ТПЧ, А:

$$I_{\Sigma\text{ТПЧ}}(v) = \frac{I_{\text{ТПЧн}}}{1,11 \cdot (v \pm 1)}, \quad (2.3)$$

де  $I_{\text{ТПЧн}}$  – номінальний струм групи ТПЧ, А:

$$I_{\text{ТПЧн}} = n_{\text{ТПЧ}} \frac{0,9U_{\alpha}I_{\alpha}}{\sqrt{3}U_{\text{н}} \cos \varphi} \cdot 10^{-3}, \quad (2.4)$$

де  $n_{\text{ТПЧ}}$  – кількість ТПЧ;

Для ТПЧ-800:  $U_{\alpha} = 800$  В,  $I_{\alpha} = 1550$  А,  $\cos \varphi = 0,8$ .

В формулі (2.3) для  $\nu = 5, 13$  – знак "+", а для  $\nu = 7, 11$  – знак "-".

Згідно ДСТУ EN 50160:2014 основними показниками, що характеризують спотворення кривої напруги, є коефіцієнт спотворення синусоїдальної форми кривої напруги та коефіцієнт  $\nu$ -ї гармоніки.

В даній лабораторній роботі рівні вищих гармонік та коефіцієнт несинусоїдальності напруги визначаються шляхом математичного моделювання електричних режимів СЕП з допомогою програми «FKU» (Додаток Б).

Розрахунок рівнів вищих гармонік струму і напруги зазвичай проводять для двох режимів – режиму з вимкненими БК, та режиму з увімкненими БК. Для другого режиму необхідно проводити перевірку БК на перевантаження струмами вищих гармонік. Умова допустимого перевантаження БК струмами вищих гармонік наступна:

$$k_{\text{п.БК}} = \frac{I_{\text{еБК}}}{I_{\text{БКном}}} \leq 1,3, \quad (2.5)$$

де  $k_{\text{п.БК}}$  – коефіцієнт перевантаження БК;

$I_{\text{БКном}}$  – номінальний струм батареї конденсаторів, А:

$$I_{\text{БКном}} = \frac{Q_{\text{БК}}}{\sqrt{3}U_{\text{н}}}, \quad (2.6)$$

$I_{\text{еБК}}$  – еквівалентний струм в колі БК, А:

$$I_{\text{еБК}} = \sqrt{\sum_{v=1}^{13} I_{\text{БК}}(v)^2} . \quad (2.7)$$

### Хід роботи

1. Скласти схему заміщення системи електропостачання, принципова схема якої приведена на рис. 2.1. Вихідні дані для розрахунку параметрів схеми заміщення згідно варіантів приведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Вихідні дані для розрахунку рівнів вищих гармонік

№ вар.	$U_{\text{ном}}$ , кВ	$S_{\text{кз}}$ , МВА	$S_{\text{тр}}$ , кВА	$S_{\text{ТП}}$ , кВА	$n_{\text{ТП}}$ , шт.	$Q_{\text{БКн}}$ , квар	$Q_{\text{БКв}}$ , квар	$S_{\text{СД}}$ , кВА	$n_{\text{СД}}$ , шт.	$n_{\text{ТПч}}$ , шт.
1	10	4000	16000	1000	6	2600	3500	750	8	2
2	10	4000	16000	1000	6	2600	3500	750	8	3
3	10	4000	16000	1000	6	2600	5800	750	8	4
4	10	4000	16000	1000	6	2600	5400	750	8	5
5	6	1000	25000	1000	8	3000	5400	500	6	5
6	6	2000	25000	1000	8	3000	5400	500	6	5
7	6	3000	25000	1000	8	3000	5400	500	6	5
8	6	4000	25000	1000	8	3000	5400	500	6	5
9	10	3000	16000	1600	7	2900	5400	1000	5	4
10	10	3000	16000	1600	7	2900	5600	1000	5	4
11	10	3000	16000	1600	7	2900	5800	1000	5	4
12	10	3000	16000	1600	7	2900	6000	1000	5	4
13	6	2500	16000	2500	9	3200	3500	750	3	3
14	6	2500	16000	2500	9	3200	3500	750	6	3
15	6	2500	16000	2500	9	3200	3500	750	9	3
16	6	2500	16000	2500	9	3200	3500	750	12	3

2. Провести розрахунок опорів параметрів схеми заміщення згідно формул 2.1 – 2.3 а також приведених в табл. 2.1, де значення потужності підставляється в МВА (Мвар), значення напруги – в кВ. Результати розрахунку занести до табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Результати розрахунку параметрів схеми заміщення СЕП

Назва параметру	Номер гармоніки, $\nu$					$L$ , Гн ( $C$ , $\Phi$ )
	1	5	7	11	13	
Опір системи, $x_{cv}$ , Ом						
Опір трансформатора зв'язку з системою, $x_{Tv}$ , Ом						
Сумарний опір системи, $x_{cv} = x_{cv} + x_{Tv}$ , Ом						
Опір цехових ТП, $x_{ТПv}$ , Ом						
Опір навантаження цехових ТП, $x_{н.v}$ , Ом						
Опір високовольтних СД, $x_{CD.v}$ , Ом						
Опір БК 10 кВ, $x_{БКв.v}$ , Ом						
Опір БК 0,4 кВ, $x_{БКн.v}$ , Ом						
Значення номінального струму групи ТПЧ (2.4) та струмів вищих гармонік, що генеруються групою ТПЧ (2.3)						—

3. Запустити програму «FKU».

4. Провести моделювання режимів роботи СЕП з вимкненими та з увімкненими БК. Для цього необхідно:

4.1. Зробити активною вкладку «Схема» (відбувається автоматично після запуску програми);

4.2. Ввести в програму розрахункові значення параметрів схеми заміщення. Програмою передбачено, що значення параметрів реактивних елементів схеми заміщення задаються в системних одиницях Гн,  $\Phi$ , а не в Ом. Тому необхідно здійснити розрахунок індуктивностей та ємностей елементів, використавши загальновідомі формули.

4.3. Провести моделювання режиму з вимкненими БК. Для цього необхідно:

4.3.1. Перевести перемикачі  $БК_{нн}$ ,  $БК_{вн}$ ,  $\Phi 5$ ,  $\Phi 7$ ,  $\Phi 11$ ,  $\Phi 13$  у положення «Викл.», а перемикач  $Н_{вн}$  – у положення «Вкл.»;

4.3.2. Перевести перемикач «Вимикач живлення» в положення «Вкл.» (повинна загорітися зеленим кольором сигнальна лампа), тим самим запустивши моделювання режиму;

4.3.3. Зробити активною вкладку «Графіки U, I», на якій зображені осцилограми напруги (вкладка «Напруга») та струму (вкладка «Струм»). З вигляду осцилограм струму та напруги можна побачити, що форма кривої напруги на шинах 10 кВ і 0,4 кВ та струму є несинусоїдальною;

4.3.4. На вкладці «Напруга» із випадаючого списку вибрати пункт  $U_{нв}$  – напруга на шинах 10 кВ.

4.3.5. Зробити активною вкладку «FFT», на якій приведені лінійні спектри вищих гармонік напруги (вкладка «Напруга») та струму (вкладка «Струм»). Занести значення коефіцієнту несинусоїдальності напруги (вкладка «Напруга») до табл. 2.4.

4.3.6. Повторити дії, зазначені в пункті 4.3.5, попередньо вибравши на вкладці «Графіки U, I» - «Напруга» із випадаючого списку пункт  $U_{нн}$  – напруга на шинах 0,4 кВ.

4.3.7. Зробити активною вкладку «FFT» - «Таблиця», на якій приведені числові результати моделювання. Занести до табл. 2.4 значення гармонік лінійної напруги на шинах 10 кВ (стовпчик U, V).

4.4. Провести моделювання режиму роботи СЕП для випадку з увімкненими БК. Для цього необхідно:

4.4.1. Зробивши активною вкладку «Схема» перевести перемикачі  $BK_{нн}$ ,  $BK_{вн}$  в положення «Вкл.».

4.4.2. Повторити дії, зазначені в пунктах 4.3.3 – 4.3.7. В пункті 4.3.7, окрім значень гармонік лінійної напруги, занести до табл. 2.4 і значення гармонік струмів в колі БК 10 кВ та в колі БК 0,4 кВ. (стовпчики «I<sub>БКВ</sub>, A» та «I<sub>БКН</sub>, A» відповідно).

5. Зробити активною вкладку «АЧХ та ФЧХ» і ознайомитися з виглядом амплітудно-частотної та фазочастотної характеристик мережі. У висновках зазначити причини, через які АЧХ та ФЧХ мають таку форму.

6. Закрити програму «FKU».

Таблиця 2.4 – Результати моделювання та розрахунків рівнів вищих гармонік в СЕП

Назва параметру	Номер гармоніки, $\nu$			
	5	7	11	13
Значення гармонік лінійної напруги на шинах 10 кВ в режимі з вимкненими БК, В				
Значення гармонік лінійної напруги на шинах 10 кВ в режимі з увімкненими БК, В				
Значення гармонік струму в колі БК 10 кВ, А				
Значення гармонік струму в колі БК 0,4 кВ, А				
Коефіцієнт несинусоїдальності напруги на стороні 10 кВ (ВН), %				
Коефіцієнт несинусоїдальності напруги на стороні 0,4 кВ (НН), %				
Коефіцієнт перевантаження БК 10 кВ струмами вищих гармонік				
Коефіцієнт перевантаження БК 0,4 кВ струмами вищих гармонік				

7. Виконати розрахунок коефіцієнтів перевантаження БК 10 кВ та БК 0,4 кВ струмами вищих гармонік.

8. Зробити висновок щодо допустимості рівнів коефіцієнтів несинусоїдальності напруги для різних режимів роботи СЕП, а також щодо значень коефіцієнтів перевантаження БК 10 кВ та БК 0,4 кВ струмами вищих гармонік.

#### **Звіт повинен містити**

1. Теоретичні відомості
2. Вихідні параметри для розрахунку.
3. Принципову схему системи електропостачання (рис. 2.1).
4. Схеми заміщення (повна схема – рис. 2.2, спрощена – рис. 2.3).

5. Результати розрахунку параметрів схеми заміщення (табл. 2.3).
6. Результати моделювання та розрахунків (табл. 2.4).
7. Висновки.

### **Контрольні запитання**

1. Що таке вищі гармоніки?
2. Які причини виникнення вищих гармонік струму та напруги в системі електропостачання, що містить вентиляльні перетворювачі, перетворювачі частоти?
3. Джерела виникнення вищих гармонік струму (при генерації, передачі та споживанні електричної енергії).
4. Які величини, що характеризують несинусоїдальність напруги, нормуються в ДСТУ EN 50160:2014, які їх допустимі та граничні значення?
5. Негативний вплив вищих гармонік на силове електрообладнання (БСК, двигуни, кабельні лінії, силові трансформатори)?
6. Негативний вплив вищих гармонік на установки систем релейного захисту, автоматики, телемеханіки та зв'язку.
7. Вищі гармоніки струму яких порядків генеруються ТПЧ-800?
8. Які технічні засоби, схемні та організаційні рішення застосовуються для зменшення рівнів вищих гармонік напруги до допустимих значень?
9. Що таке АЧХ та ФЧХ? Пояснити, чому для режиму роботи СЕП з увімкненими БК вони мають саме такий вигляд.

**Лабораторна робота № 3**  
**ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМИ**  
**ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИМИ**  
**ПРИСТРОЯМИ**

**Мета роботи:** набути практичних навичок розрахунку параметрів та вибору ФКП; дослідити параметри режиму роботи системи електропостачання з ФКП.

**Теоретичні відомості**

Зниження рівнів вищих гармонік в електричних мережах є частиною загальної задачі зменшення впливу нелінійних навантажень на мережу живлення та покращення якості електроенергії в системах електропостачання підприємств. Комплексне вирішення цієї задачі полягає в застосуванні багатофункціональних пристроїв, що забезпечують мінімізацію рівнів вищих гармонік в системах електропостачання підприємств і компенсацію реактивної потужності. Прикладом таких багатофункціональних пристроїв являються силові резонансні фільтри вищих гармонік або фільтрокомпенсуючі пристрої (ФКП). Також ФКП можуть використовуватися для симетрування системи лінійних напруг в СЕП. Ці пристрої можуть встановлюватися для розділення лінійних і нелінійних навантажень (загороджувальні фільтри) або для шунтування (поглинання) струмів вищих гармонік.

Спрощені схеми ФКП показані на рис. 3.1. За умовами зручності і надійності компоновання електрообладнання найбільше розповсюдження отримала схема, приведена на рис. 3.1, б.

Як правило, в мережах з 12-фазними вентильними перетворювачами встановлюються ФКП 11-ї і 13-ї гармонік, з 6-фазними – ФКП 5-ї, 7, 11 і 13 гармонік, те ж при наявності 6 і 12-фазних перетворювачів. В установках з ДСП використовуються ФКП 2-ї, 3, 4, 5 гармонік або широкосмугові фільтри. Зустрічаються і інші сполучення ФКП.

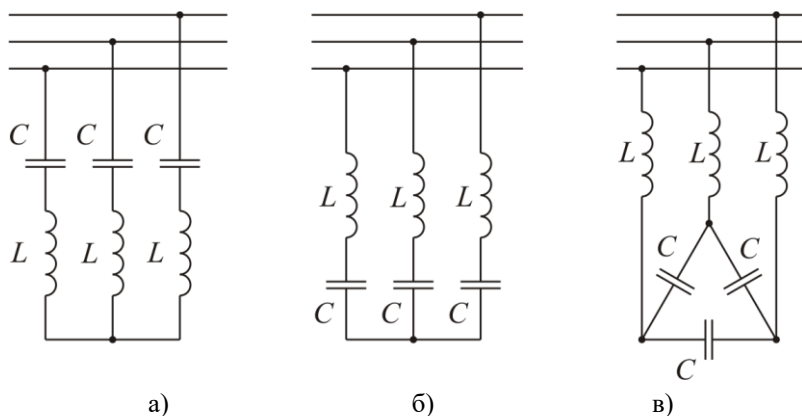


Рис. 3.1. Спрощені схеми ФКП

Технічними умовами на експлуатацію БК передбачається обмеження напруги і струму понад номінальні значення деякими величинами  $c_u$  та  $c_i$  (в долях номінальних значень). В залежності від типу конденсаторів  $c_u = 1$  або  $c_u = 1,1$ ;  $c_i = 1,3$  або  $c_i = 1,5$ .

Відносне відхилення від частоти резонансу пов'язане з добротністю ФКП  $Q_\phi$  співвідношенням:

$$\frac{f}{f_{\text{рез}}} = \sqrt{\frac{2 - \frac{1}{Q_\phi^2}}{2}}. \quad (3.1)$$

При  $Q_\phi \geq 6$  виявляється  $\frac{f}{f_{\text{рез}}} \approx 1$ . На практиці  $Q_\phi \geq 20$ , тому вибір і розрахунок ФКП звичайно ведуть з урахуванням лише реактивних опорів.

Знайдемо вираз для потужності БК ФКП  $v$ -ї гармоніки, вважаючи, що в колі ФКП протікає лише струм 1-ї та  $v_p$ -ї гармонік. Напруга на БК не перевищує допустимого (номінального) значення, якщо дотримується співвідношення:

$$K_Q a_p k_u \leq c_u \quad (3.2)$$

де  $a_p$  – коефіцієнт, що дорівнює

$$a_p = \frac{v_p^2}{v_p^2 - 1}, \quad (3.3)$$

де  $v_p$  – гармоніка, на яку налаштований ФКП потужністю  $Q_p$ .

$K_Q$  – коефіцієнт, що дорівнює

$$K_Q = 1 + \frac{Q_p}{S_k}, \quad (3.4)$$

$k_u$  – коефіцієнт перенапруги, що дорівнює

$$k_u = \frac{U_{\max}}{U_{\text{ном.р}}}, \quad (3.5)$$

де  $U_{\max}$  – найбільше можливе в експлуатації значення лінійної напруги на шинах підстанції;

$U_{\text{ном.р}}$  – номінальна лінійна напруга БК ФКП.

Після підключення ФКП напруга в мережі збільшується пропорційно коефіцієнту  $a_p$  (при  $v=5$   $a_p=1,042$ ;  $v=7$   $a_p=1,03$ ;  $v=11$   $a_p=1,008$ ;  $v=13$   $a_p=1,006$ ).

Таким чином, максимальна напруга на затискачах БК:

$$U_{\text{БК max}} = U_c k_u K_Q a_p \quad (3.6)$$

де  $U_c$  – напруга мережі.

Неприпустимі перевантаження конденсаторів ФКП за струмом не мають місця, якщо виконується умова

$$\sqrt{I_{1p}^2 + \Sigma I_{vp}^2} \leq c_i I_{ном,р}, \quad (3.7)$$

де  $I_{1p}$  та  $I_{vp}$  – струми 1-ї та  $v_p$ -ї гармонік в колі ФКП;

$I_{ном,р}$  – номінальний струм БК.

Якщо в мережі встановлено декілька ФКП, то можна вважати, що через кожний ФКП проходять струми 1-ї гармоніки і гармоніки, на частоту якої ФКП налаштований, а також невеликі некомпенсовані струми інших вищих гармонік  $I_{vk(p)}$ , тобто

$$I_{vp} = \sqrt{\sum_{k=1}^n I_{vk(p)}^2}. \quad (3.8)$$

В цьому випадку вираз для потужності БК ФКП  $v_p$ -ї гармоніки при з'єднанні в зірку може бути представлено у вигляді:

$$Q_p \geq \frac{\sqrt{3} U_{ном,р} I_{vp}}{\sqrt{c_i^2 - a_p^2 k_u^2}}. \quad (3.9)$$

Спрощений вираз для  $Q_p$ , зручний для практичного застосування, має вигляд:

$$Q_p \geq 1,2 k_c U_{ном,р} I_{vp}, \quad (3.10)$$

де  $k_c$  – коефіцієнт схеми. При з'єднанні конденсаторів в трикутник  $k_c = \sqrt{3}$ , а при з'єднанні в зірку –  $k_c = 3$ .

Ємнісний  $X_C$  та індуктивний  $X_L$  опори, Ом, при основній частоті визначаються за формулами:

$$X_C = \frac{U_{\text{ном}}^2}{Q_{\text{БК}}}, \quad (3.11)$$

$$X_L = \frac{X_C}{v_p^2}, \quad (3.12)$$

де  $U_{\text{ном}}$  – номінальна напруга, кВ;

$Q_{\text{БК}}$  – номінальна реактивна потужність БК, квар.

Потужність БК в схемі ФКП менша, за наявну (при  $U = U_{\text{ном}}$ ) на величину  $\frac{100}{v_p^2}$ , %. Зазвичай, компенсаційна спроможність БК в колах

ФКП приймається на 10-15 % менше номінальної.

Для врахування обмежень по потужності БК необхідно також дотримуватися умови:

$$Q_p \geq Q_{1p} + Q_{vp}, \quad (3.13)$$

де  $Q_{1p}$  і  $Q_{vp}$  – реактивна потужність БК на частотах 1-ї та  $v_p$ -ї гармонік (по Будеану).

Ця умова виконується, якщо:

$$a_p^2 k_u^2 + \sum_{p=2}^n \left( \frac{I_{vp}}{I_{\text{ном},p}} \right)^2 \frac{1}{v_p^2} \leq 1. \quad (3.14)$$

Припускаючи, що через ФКП протікають струми 1-ї та  $v_p$ -ї гармонік, умова відсутності перевантаження БК за потужністю представляється у вигляді:

$$K_Q a_p k_u \leq \sqrt{1 - \frac{0,7}{v_p}}. \quad (3.15)$$

При стабільній несиметрії напруг ФКП можуть використовуватися одночасно і як симетруючі пристрої, оскільки при промисловій частоті індуктивний опір реакторів невеликий в порівнянні з опором БК.

В даній лабораторній роботі необхідно розрахувати ФКП 5, 7, 11 і 13 гармонік для системи електропостачання, що містить тиристорні перетворювачі частоти ТПЧ-800 (згідно варіанту індивідуального завдання для лабораторної роботи № 2 «Дослідження режимів роботи СЕП з джерелами вищих гармонік»), та провести математичне моделювання режимів роботи СЕП з ФКП, використавши програму «FKU». В якості математичної моделі ФКП в даній програмі обране коло з паралельним з'єднанням активного, індуктивного та ємнісного елементів (див. вкладку «Схема»). В якості параметрів ФКП виступають активний опір, індуктивність та ємність. Значення індуктивності та ємності ФКП визначаються по загальновідомим формулам в залежності від індуктивного опору обраних реакторів та ємнісного опору обраних батарей конденсаторів. Активний опір ФКП залежить від індуктивності реакторів  $L_p$ , ємності батарей конденсаторів  $C_{БК}$  і добротності ФКП,  $Q_{ФКП}$ :

$$R_{ФКП} = \frac{\sqrt{L_p / C_{БК}}}{Q_{ФКП}}. \quad (3.16)$$

### Хід роботи

1. Провести розрахунок параметрів ФКП для системи електропостачання з попередньої лабораторної роботи (№2). Розрахунок оформити у вигляді таблиці 3.1.

Технічні дані ФКП наведені в Додатку В.

Таблиця 3.1. – Розрахунок параметрів ФКП

№ n/n	Вихідні і розрахункові величини	Розрахункова формула	№ гармоніки			
			5	7	11	13
1	2	3	4	5	6	7
<i>Вихідні дані</i>						
1.	Потужність трифазного КЗ на шинах 10 кВ СЕП, МВА	$S_{кз}$				
2.	Робоча напруга, кВ	$U_{ш}$				
3.	Номінальна напруга БК, кВ	$U_{н.БК}$				
4.	Розрахункові величини гармонік напруги, В	$U_v$				
5.	Розрахункові величини гармонік напруги, %	$U_{v,\%} = \frac{U_v}{U_{ном}} \cdot 100\%$				
6.	Допустимі гармоніки лінійної напруги, % (за ДСТУ EN 50160:2014)	$U_{v доп}$				
7.	Розрахункові величини струмів вищих гармонік, А	$I_v$				
8.	Сумарна (необхідна) потужність БК, встановлених на ГЗП, квар	$Q_{необх}$				
<i>Вибір БК для фільтрів</i>						
9.	Коефіцієнт, що характеризує збільшення напруги основної частоти на БК порівняно з $U_{ш}$ , в.о.	$a_p = \frac{v^2}{v^2 - 1}$				
10.	Напруга основної частоти на БСК ФКП, кВ	$U_{1c} = \frac{\alpha U_{ш}}{\sqrt{3}}$				

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4	5	6	7
11.	Попередньо обрана номінальна напруга фільтру	$U_{1c} \leq U_{н.бк} \leq 1.3U_{1c}$				
12.	Коефіцієнт завантаження батареї по напрузі основної частоти	$0,77 \leq C_{U1} = \frac{U_{1c}}{U_{н.бк}} \leq 1$				
13.	Коефіцієнт завантаження батареї по повному струму	$C_i = \frac{1}{C_{U1}} \leq C_{i.д.д} = 1,3$				
14.	Коефіцієнт завантаження батареї за струмом гармоніки	$C_{iv} = \sqrt{C_i^2 - C_{U1}^2} \leq C_{ivдоп} = \sqrt{1,3^2 - C_{U1}^2}$				
15.	Потужність батареї за умовою ефективності поглинання струму гармоніки, квар	$Q_{бк}' = K_p S_{кз} \cdot 10^3$ де $K_p \geq 0,45 \cdot 10^{-2}, v = 5$ $K_p \geq 0,25 \cdot 10^{-2}, v = 7$ $K_p \geq 0,1 \cdot 10^{-2}, v = 11, 13$				
16.	Потужність БК за умовою недопустимого перевантаження, квар	$Q_{бк}'' \geq \frac{3U_{н.бк} K_{iv} I_v}{C_{iv}}$ $K_{iv} = 1,2, v = 5, 7$ $K_{iv} = 1,1, v = 11, 13$				
17.	Прийнята стандартна потужність батареї фільтру, квар (найбільше із значень по пп. 13, 14)	$Q_{н.ф}$				
18.	Номінальний струм батареї фільтру, А	$I_{н.ф} = \frac{Q_{н.ф.}}{3U_{н.бк}}$				

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4	5	6	7
19.	Компенсаційна здатність фільтру, квар	$Q_{1\phi} = Q_{н.ф} C_{U1}^2$				
20.	Сумарна компенсаційна потужність всіх фільтрів, квар	$Q_{1\phi i} = \sum_1^n Q_{1\phi i}$				
21.	Необхідна додаткова потужність компенсуючих пристроїв	$Q_{к.п} = Q_{необх} - Q_{1\phi i}$				
22.	Характеристичний опір фільтру, Ом	$\rho = \frac{3U_{н.бк}^2}{Q_{н.ф} v} \cdot 10^3$				
23.	Максимальна напруга резонансної частоти на елементах фільтру, кВ	$U_{vc,max} = U_{vp,max} = I_{н.ф} \cdot C_{ivдоп} \rho \cdot 10^{-3}$				
24.	Максимальна повна напруга на батареї фільтру, кВ	$U_{с,max} = \sqrt{U_{1c}^2 + U_{vc,max}^2}$				
25.	Фактичний коефіцієнт завантаження батареї за струмом гармоніки	$C_{iv\phi} = \frac{I_v K_{iv}}{I_{н.ф}}$				
<i>Вибір реакторів фільтрів</i>						
26.	Реактивний опір реактора на основній частоті, Ом	$X_{1p} = \frac{\rho}{v}$				
27.	Номінальний струм реактора фільтру, А	$I_{н.р} \geq 1,3I_{н.ф}$				

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4	5	6	7
28.	Напруга основної частоти на реакторі фільтру, кВ	$U_{1p} = \frac{1}{v^2 - 1} \cdot \frac{U_{ш}}{\sqrt{3}}$				
29.	Максимальна повна напруга на реакторі фільтру, кВ	$U_{p, \max} = \sqrt{U_{1p}^2 + U_{vp, \max}^2}$				
30.	Номінальна напруга реактора фільтра, кВ	$U_{н.р} \geq U_{p, \max}$				
<i>Визначення ефективності фільтру</i>						
31.	Необхідна добротність фільтру	$q_v \geq \frac{C_{iv\phi} m \cdot}{\sqrt{\left( (U_{v \text{ доп}} v \right)^2 - \times 100}} \cdot \frac{1}{\sqrt{-\left( C_{iv\phi} m \alpha^2 \cdot 100 \right)^2}}$ <p>де <math>\alpha = 0,015</math></p> $m = \frac{\sqrt{3} U_{н.бк}}{U_{ш}}$				
32.	Прийнята добротність фільтру	$q_{vh}$				
33.	Залишкова лінійна напруга гармоніки після встановлення фільтру, %	$U_{v \text{ ост}} = \frac{C_{ivw} m \cdot 100}{v} \cdot \times \sqrt{\frac{1}{q_v^2} + \alpha^2}$				

1	2	3	4	5	6	7
34.	Коефіцієнт ефективності фільтру	$K_{\text{еф}} = \frac{U_{\text{вост}}}{U_{\text{в},\%}} \leq 1$				
35.	Коефіцієнт несинусоїдальності після встановлення фільтрів, %	$K_{\text{нсU}} = \sqrt{\sum_1^m (U_{\text{вост}})^2}$				

2. Розрахувати активний опір, індуктивність та ємність обраних ФКП 5, 7, 11, 13 гармонік. Результати розрахунку оформити у вигляді табл. 3.2.

Таблиця 3.2. – Результати розрахунку параметрів ФКП

Резонансна частота ФКП	R, Ом	L, Гн	C, Ф
5			
7			
11			
13			

3. Провести математичне моделювання режимів роботи системи електропостачання з ФКП. Для цього необхідно:

3.1. Запустити програму «FKU».

3.2. Ввести параметри елементів схеми СЕП, параметри ФКП 5, 7, 11, 13 гармонік (табл. 3.2) та провести моделювання режиму роботи СЕП з увімкненими БК (див. лабораторну роботу № 2).

3.3. Перевести вимикач БК<sub>ВН</sub> у положення «Вимк.» а перемикачі Ф5, Ф7, Ф11, Ф13 у положення «Вкл.» та запустити моделювання.

3.4. Порівняти значення коефіцієнту несинусоїдальності напруги отриманого в результаті розрахунку (табл. 3.1) та в результаті моделювання.

3.5. Зробити активною вкладку «АЧХ та ФЧХ». Роздрукувати їх: «Файл» - «Друк» - «АЧХ, ФЧХ».

## **Звіт повинен містити**

1. Теоретичні відомості.
2. Спрощені схеми ФКП.
3. Схема заміщення СЕП з ФКП 5, 7, 11, 13 гармонік (див. вкладку «Схема» програми «FKU».
4. Результати розрахунку ФКП (табл. 3.1).
5. Результати розрахунку параметрів схеми заміщення ФКП (табл. 3.2).
6. АЧХ та ФЧХ системи електропостачання з ФКП (роздруковані).
7. Висновки.

## **Контрольні запитання**

1. Що таке ФКП? Які елементи входять до складу ФКП?
2. Чому ФКП називають багатофункціональним засобом?
3. Який вигляд має спрощена схема ФКП? До якого класу фільтрів відносять ФКП?
4. Виходячи із яких умов обирається потужність БК ФКП?
5. Виходячи із якої умови обирається опір реактора ФКП?
6. Що таке добротність ФКП?
7. Що таке характеристичний опір ФКП?
8. Що таке АЧХ та ФЧХ? Пояснити, чому для режиму роботи СЕП з увімкненими ФКП вони мають саме такий вигляд?
9. Які види релейного захисту використовуються для ФКП?
10. Які існують схемні рішення для зменшення несинусоїдальності напруги?
11. Які інші технічні засоби зменшення несинусоїдальності напруги існують, крім ФКП?
12. Які існують переваги та недоліки ФКП в порівнянні з іншими технічними засобами зменшення несинусоїдальності напруги?
13. Які рівні коефіцієнту несинусоїдальності (нормально- та гранично допустимі) для різних класів напруг передбачено стандартом ДСТУ EN 50160:2014?
14. Чому застосування ФКП є недоцільним для крупних вузлових підстанцій?

## Лабораторна робота № 4

### ПРИЛАДНИЙ КОНТРОЛЬ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ В МЕРЕЖІ

**Мета роботи:** ознайомитися з нормами згідно ДСТУ EN 50160:2014, що регламентують значення усталеного відхилення напруги на затискачах приймачів; набути практичних навичок вимірювання усталеного відхилення напруги в мережі з допомогою вимірювача струму і відхилення напруги типу 43203; набути практичних навичок статистичної обробки результатів вимірювань усталеного відхилення напруги.

#### Теоретичні відомості

Згідно ДСТУ EN 50160:2014 для мереж напругою до 35 кВ в нормальних робочих умовах, за винятком періодів, під час котрих відбувались переривання напруги, відхилення напруги не повинні перевищувати  $\pm 10\%$  від величини номінальної напруги  $U_{\text{ном}}$  (рис. 4.1); в умовах, коли електричну енергію постачають електромережі без зв'язку з об'єднаною енергосистемою чи до особливо віддалених користувачів мережею, відхилення напруги не повинні перевищувати  $+10\% / -15\%$  від  $U_{\text{ном}}$ .

Для мереж, напругою вище 35 кВ стандартом ДСТУ EN 50160:2014 не передбачено нормування відхилення напруги. Це пов'язано з тим, що кількість користувачів, які отримують електроенергію безпосередньо від мереж високої напруги, є обмеженою та, зазвичай, вони мають індивідуальні контракти на постачання електричної енергії.

Вимірювання усталеного відхилення напруги  $\delta U_y$  проводять наступним чином.

Для кожного  $i$ -го спостереження за період часу, рівний 7 діб вимірюють значення напруги (з 10-ти хвилинним усередненням), яке в електричних мережах однофазного струму визначають як діюче значення напруги основної частоти  $U_{(1)i}$ , В, кВ, без урахування вищих гармонік напруги, а в електричних мережах трьохфазного струму – як діюче значення кожної міжфазної (або фазної) напруги основної частоти  $U_{(1)i}$ , а

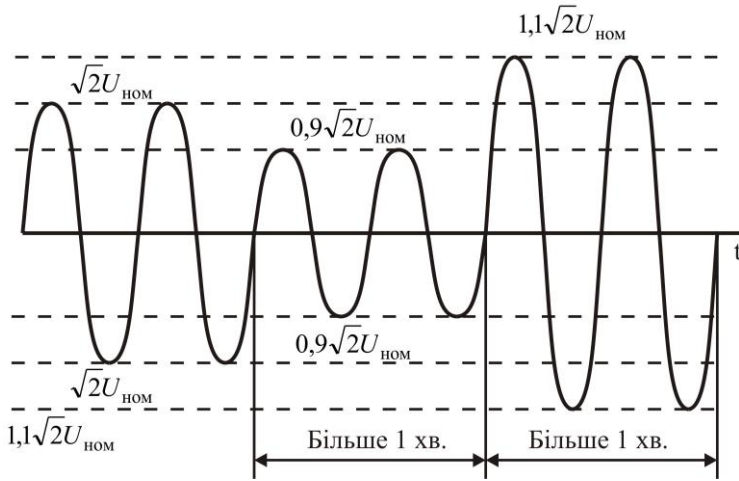


Рис. 4.1. Відхилення напруги в мережі

також як діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти  $U_{1(1)i}$ , що визначається за формулою:

$$U_{1(1)i} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[ \left( \sqrt{3}U_{AB(1)i} + \sqrt{4U_{BC(1)i}^2 - \left( \frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} + U_{AB(1)i}^2 \right)^2} \right)^2 + \left( \frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2 \right]}, \quad (4.1)$$

де  $U_{AB(1)i}$ ,  $U_{BC(1)i}$ ,  $U_{CA(1)i}$  – діюче значення міжфазних напруг основної частоти в  $i$ -му спостереженні, В, кВ.

При визначенні усталеного значення відхилення напруги допускається:

1. Визначати  $U_{1(1)i}$  методом симетричних складових.
2. Визначати  $U_{1(1)i}$  по наближеній формулі

$$U_{1(1)i} = \frac{1}{3}(U_{AB(1)i} + U_{BC(1)i} + U_{CA(1)i}). \quad (4.2)$$

При цьому відносна похибка обчислення значень  $U_{1(1)i}$  з використанням формули (4.2) замість формули (4.1) не перевищує 0,1 % при коефіцієнті несиметрії напруг по зворотній послідовності, що не перевищує 6 %.

3. Вимірювати в електричних мережах однофазного і трифазного струму замість діючих значень фазних і міжфазних напруг основної частоти діючі значення відповідних напруг з урахуванням гармонічних складових цих напруг при коефіцієнті викривлення синусоїдальності напруги, що не перевищує 5 %.

Обчислюють значення усередненої напруги  $U_y$  в В, кВ як результат усереднення  $N$  спостережень напруги  $U_{(1)i}$  або  $U_{1(1)i}$  за інтервал часу 1 хв. за формулою:

$$U_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N U_i^2}{N}}, \quad (4.3)$$

де  $U_i$  – значення напруги  $U_{(1)i}$  або  $U_{1(1)i}$  в  $i$ -му спостереженні, В, кВ.

Число спостережень за 1 хв. повинне бути не менш, як 18.

Обчислюють значення усталеного відхилення напруги  $\delta U_y$  у відсотках за формулою:

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100, \quad (4.4)$$

де  $U_{\text{ном}}$  – номінальна міжфазна (фазна) напруга, В, кВ.

Для мереж напругою до 1 кВ за нормальних робочих умов, протягом кожного тижневого періоду 95 % середньоквадратичних значень напруги електропостачання, які усереднені на 10-ти хвилинному

проміжку, мають бути в межах  $\pm 10\%$ ; і усі середньоквадратичні значення напруги електропостачання, усереднені на 10-ти хвилинному проміжку, мають бути в межах  $+10\% / -15\%$ .

Для електричних мереж напругою від 1 кВ до 35 кВ щонайменше 99 % середньоквадратичних значень напруги електропостачання, які усереднені на 10-ти хвилинному проміжку, мають бути нижче ніж верхній допуск  $+10\%$ , щонайменше 99 % середньоквадратичних значень напруги електропостачання, які усереднені на 10-ти хвилинному проміжку, мають бути вище ніж нижній допуск мінус  $10\%$ .

#### *Опис приладу «Вимірювач струму і відхилення напруги типу 43203»*

Даний прилад призначений для вимірювання сили змінного струму і відхилення напруги від нормального у відсотках.

Ряд номінальних напруг: для трифазних мереж: 100, 380 В; для однофазних мереж:  $100/\sqrt{3}$ ;  $380/\sqrt{3}$  В.

Прилад може бути використаний при експлуатації мереж трифазного струму.

Прилад забезпечує вивід вимірюваної інформації показника якості електричної енергії (відхилення напруги) і сили змінного струму для реєстрації самописними приладами постійного струму на номінальну напругу 5 В з вхідним опором не менш як 1 кОм, або іншими реєстраторами.

В табл. 4.1 приведені робочі умови застосування приладу 43203.

Таблиця 4.1 – Робочі умови застосування приладу

Показник	Значення
Напруга живлячої мережі, В	176 – 250
Частота змінного сигналу з живлячої мережі, Гц	49,3 – 50,3
Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму чи напруги в вимірювальних ланцюгах, %, не більше	20

Діапазони вимірювань і межі допустимих значень абсолютної основної похибки ( $\Delta$ ) приладу в нормальних умовах експлуатації (табл. 4.3) відповідають значенням, вказаним в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Діапазон вимірювань і межі допустимих значень основної похибки приладу

Вид вимірювань	Діапазон вимірювань	Значення вимірюваної величини	Межа допустимого значення абсолютної основної похибки, $\Delta$	Ступінь квантування
Відхилення напруг, %	-20...+20	-20...-10	$\pm 2$	0,01
		-10...+10	$\pm 1$	
		+10...+20	$\pm 2$	
Сила струму	0...5 А	0...5 А	$\pm 0.125$	0,01

Таблиця 4.3 – Умови експлуатації приладу

Впливаюча величина	Нормальне значення
Температура оточуючого повітря, °С	$20 \pm 5$
Відносна вологість повітря, %	30 – 80
Частота змінного сигналу з живлячої мережі, Гц	$50 \pm 0,5$
Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму чи напруги у вимірювальних ланцюгах, %, не більше	5
Коефіцієнт зворотної послідовності напруги, %	20
Напруга мережі живлення, В	198 – 242

Швидкодія приладу – не менше 5 вимірів за секунду.

Прилад має уніфікований вихідний сигнал – напруга постійного струму  $0 - 5 \text{ В} \pm 0,5 \text{ В}$ , що характеризується статичними характеристиками. Пульсації напруги постійного струму не більше 1 % верхньої межі вимірювання вихідного сигналу. Опір навантаження не менше 1 кОм.

Межа допустимого значення додаткової похибки приладу, викликаной зміною температури оточуючого повітря в межах робочих температур на кожні 10 °С, рівний половині межі допустимого значення основної похибки.

Межа допустимого значення додаткової похибки приладу, що викликана дією зовнішнього однорідного магнітного поля з індукцією 0,5 мТ що змінюється синусоїдально з часом з частотою мережі живлення, рівна половині межі допустимого значення основної похибки.

Межа допустимого значення додаткової похибки приладу, що викликана впливом підвищеної вологості в робочих умовах застосування, дорівнює межі допустимого значення основної похибки.

Схема підключення приладу до мережі приведена на рис. 4.2.

### **Хід роботи**

1. Ознайомитись з методикою проведення вимірювань та аналізу результатів (Додаток Д).

2. Зібрати схему для вимірювання, зображену на рис. 4.2 а.

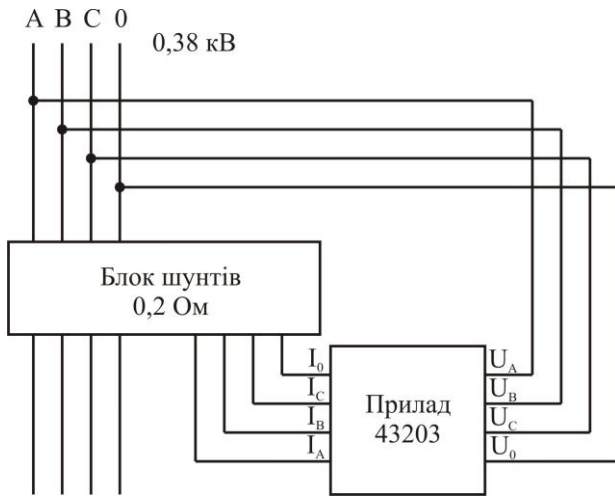
3. Після перевірки зібраної схеми викладачем увімкнути живлення стенду і приладу.

4. Провести вимірювання усталеного відхилення напруги. Рівень навантаження в процесі вимірювання змінюється викладачем. Тривалість вимірювання та інтервал дискретизації згідно варіанту наведено в табл. 4.4. Результати вимірювань оформлюються у вигляді табл. Д.1.

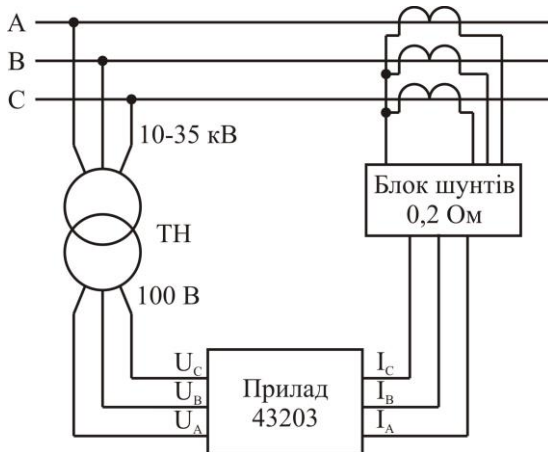
5. Розрахувати ймовірності потрапляння в інтервали усталеного відхилення напруги а також інтегральну ймовірність (формули (Д.6) – (Д.8). Кількість інтервалів згідно варіанту вказано в табл. 4.4. Результати розрахунків оформити у вигляді табл. Д.2.

6. Побудувати гістограму зміни усталеного відхилення напруги.

7. Обчислити основні статистичні характеристики показників якості електричної енергії (формули (Д.9) – (Д.11). Результати розрахунків оформити у вигляді табл. Д.3.



а)



б)

Рис. 4.2. Схема підключення приладу до мережі  
а) до мережі 0,4 кВ, б) до мережі 10-35 кВ

Таблиця 4.4 – Вихідні дані для розрахунку

№ варіанту	Тривалість вимірювання, $T_{\text{вим}}, \text{с}$	Інтервал дискретизації, $\Delta t, \text{с}$	Кількість інтервалів, $N_{\text{інт}}, \text{шт.}$
1	144	3	6
2	192	4	7
3	240	5	8
4	144	3	7
5	192	4	8

### Звіт повинен містити

1. Теоретичні відомості.
2. Вихідні данні кожного з членів бригади.
3. Схеми підключення приладу до мережі 0,4 кВ та 10-35 кВ.
4. Результати вимірювань (табл. Д.1).
5. Результати розрахунків (табл. Д.2, Д.3).
6. Гістограма зміни усталеного відхилення напруги.
7. Висновки.

### Контрольні запитання

1. Які межі значень відхилення напруги визначені стандартом ДСТУ EN 50160:2014?
2. Причини виникнення усталеного відхилення напруги в мережі.
3. Який метод розрахунку покладено в основу роботи приладу 43203?
4. Порядок розрахунку ймовірності потрапляння в інтервал та інтегральної ймовірності усталеного відхилення напруги. Суть цих показників.
5. Порядок побудови гістограми зміни усталеного відхилення напруги.
6. Які статистичні показники, що характеризують усталене відхилення напруги розраховувались в даній роботі? Порядок їх розрахунку.

## Лабораторна робота № 5

### ПРИЛАДНИЙ КОНТРОЛЬ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГ В МЕРЕЖІ

**Мета роботи:** ознайомитися з вимогами, що висуваються ДСТУ EN 50160:2014 до несиметрії напруги; набути практичних навичок вимірювання ПЯЕ несиметрії напруг з допомогою приладу «Вимірювач несиметрії цифровий 43204»; набути практичних навичок статистичної обробки результатів вимірювань показників несиметрії напруг.

#### Теоретичні відомості

Згідно ДСТУ EN 50160:2014 для електричних мереж всіх класів напруги до 1 кВ за нормальних робочих умов протягом кожного тижневого періоду 95 % середньоквадратичних значень напруги зворотної послідовності, усереднених на 10-ти хвилинному проміжку, мають бути в межах від 0 % до 2 % від напруги прямої послідовності (в стандарті ДСТУ EN 50160:2014 наведено значення тільки для складової зворотної послідовності, тому що ця складова частина стосується можливих взаємних впливів підключеного до системи устаткування);

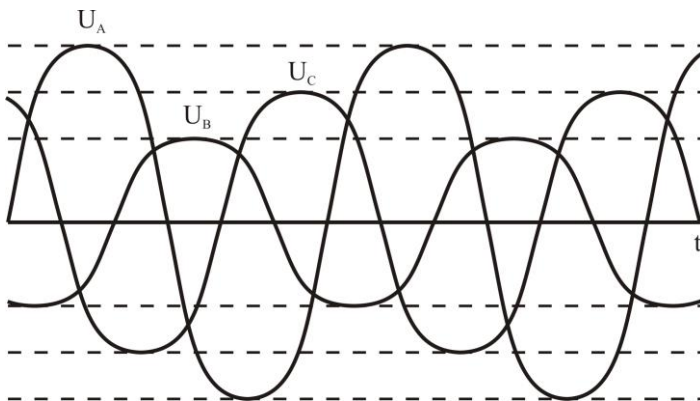


Рис. 5.1. Несиметрія напруг в мережі

Вимірювання коефіцієнту несиметрії напруг по зворотній послідовності здійснюють наступним чином. Для кожного  $i$ -го спостереження за період часу, рівний 24 год., вимірюють одночасно діючі

значення міжфазних напруг по основній частоті  $U_{AB(1)i}$ ,  $U_{BC(1)i}$ ,  $U_{CA(1)i}$ , В, кВ.

Обчислюють діюче значення напруги зворотної послідовності основної частоти  $U_{2(1)i}$  за формулою

$$U_{2(1)i} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[ \left( \sqrt{3}U_{AB(1)i} - \sqrt{4U_{BC(1)i}^2 - \left( \frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}^2} + U_{AB(1)i}^2 \right)^2} \right)^2 + \left( \frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}^2} \right)^2 \right]}. \quad (5.1)$$

Обчислюють коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності  $K_{2U_i}$  у відсотках як результат і-го спостереження по формулі:

$$K_{2U_i} = \frac{U_{2(1)i}}{U_{1(1)i}} \cdot 100, \quad (5.2)$$

де  $U_{2(1)i}$  – діюче значення напруги зворотної послідовності основної частоти трифазної системи напруг в і-му спостереженні, В, кВ.

$U_{1(1)i}$  – діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти трифазної системи напруг в і-му спостереженні, В, кВ.

При визначенні  $K_{2U_i}$  допускається:

1. Визначати  $U_{2(1)i}$  методом симетричних складових;
2. Обчислювати  $U_{2(1)i}$  по наближеній формулі:

$$U_{2(1)i} = 0,62(U_{нб(1)i} - U_{нм(1)i}), \quad (5.3)$$

де  $U_{\text{нб}(1)i}$ ,  $U_{\text{нм}(1)i}$  – найбільше і найменше діюче значення із трьох міжфазних напруг основної частоти в  $i$ -му спостереженні, В, кВ.

При цьому відносна похибка визначення  $U_{2(1)i}$  з використанням формули (5.3) замість формули (5.1) не перевищує 8 %;

3. Застосовувати при обчисленні  $U_{2(1)i}$  замість діючих значень міжфазних напруг основної частоти діючі значення відповідних напруг з урахуванням гармонічних складових цих напруг при коефіцієнті спотворення синусоїдальності напруги, що не перевищує 5 %.

4. Обчислювати  $K_{2U_i}$  за формулою:

$$K_{2U_i} = \frac{U_{2(1)i}}{U_{\text{ном.мф.}}}, \quad (5.4)$$

де  $U_{\text{ном.мф.}}$  – номінальне значення міжфазної напруги, В, кВ.

При цьому відносна похибка визначення  $K_{2U_i}$  з використанням формули (5.4) замість формули (5.2) чисельно дорівнює значенню відхилення напруги  $U_{1(1)i}$  від  $U_{\text{ном.мф.}}$ .

Обчислюють значення коефіцієнту несиметрії напруг по зворотній послідовності  $K_{2U}$  у відсотках як результат усереднення  $N$  спостережень  $K_{2U_i}$  на інтервалі часу  $T_{vs}$ :

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{2U_i}^2}{N}}. \quad (5.5)$$

За необхідності, вимірювання коефіцієнту несиметрії напруг по нульовій послідовності  $K_{0U_i}$  проводять в чотирьохпроводних мережах наступним чином.

Для кожного і-го спостереження за період часу, рівний 24 год., вимірюють одночасно діючі значення трьох міжфазних і двох фазних напруг основної частоти  $U_{AB(1)i}$ ,  $U_{BC(1)i}$ ,  $U_{CA(1)i}$ ,  $U_{A(1)i}$ ,  $U_{B(1)i}$ , В, кВ.

Визначають діюче значення напруги нульової послідовності основної частоти  $U_{0(1)i}$  в і-му спостереженні за формулою.

$$U_{0(1)i} = \frac{1}{6} \sqrt{\left[ \frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} - 3 \frac{U_{B(1)i}^2 - U_{A(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right]^2 + \left[ \sqrt{4U_{BC(1)i}^2 - \left( U_{AB(1)i} - \frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2} - 3 \sqrt{4U_{B(1)i}^2 - \left( U_{AB(1)i} - \frac{U_{B(1)i}^2 - U_{A(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2} \right]^2} \quad (5.6)$$

Обчислюють коефіцієнт несиметрії напруги по нульовій послідовності  $K_{0U_i}$  у відсотках, як результат і-го спостереження за формулою:

$$K_{0U_i} = \frac{\sqrt{3}U_{0(1)i}}{U_{1(1)i}} \cdot 100, \quad (5.7)$$

де  $U_{0(1)i}$  – діюче значення напруги нульової послідовності основної частоти трифазної системи напруг в і-му спостереженні, В, кВ.

$U_{1(1)i}$  – діюче значення міжфазної напруги прямої послідовності основної частоти, В, кВ.

При визначенні  $K_{0U_i}$  допускається:

1. Визначати  $U_{0(1)i}$  методом симетричних складових.
2. Визначати  $U_{0(1)i}$  при симетрії міжфазних напруг за наближеною формулою:

$$U_{0(1)i} = 0,62(U_{нб.ф(1)i} - U_{нм.ф(1)i}), \quad (5.8)$$

де  $U_{\text{нб.ф}(1)i}$ ,  $U_{\text{нм.ф}(1)i}$  – найбільше і найменше з трьох діючих значень фазних напруг основної частоти в  $i$ -му спостереженні, В, кВ.

При цьому відносна похибка визначення  $K_{0U_i}$  з використанням формули (5.8) замість формули (5.6) не перевищує  $\pm 10\%$ .

3. Застосовувати замість діючих значень міжфазних і фазних напруг основної частоти діючі значення відповідних напруг з урахуванням всіх гармонічних складових цих напруг при коефіцієнті спотворення синусоїдальності кривих напруг, що не перевищує  $5\%$ .

4. Визначати  $K_{0U_i}$  за формулою:

$$K_{0U_i} = \frac{U_{0(1)i}}{U_{\text{ном.ф}}} \cdot 100, \quad (5.9)$$

де  $U_{\text{ном.ф}}$  – номінальне значення напруги, В, кВ.

При цьому відносна похибка визначення  $K_{0U_i}$  з використанням формули (5.9) замість формули (5.7) чисельно дорівнює значенню відхилення напруги  $U_{1(1)i}$  від  $U_{\text{ном}}$ .

Обчислюють значення коефіцієнту несиметрії напруг по нульовій послідовності  $K_{0U}$  у відсотках як результат усереднення  $N$  спостережень  $K_{0U_i}$  на інтервалі часу  $T_{vs}$ :

$$K_{0U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{0U_i}^2}{N}}. \quad (5.10)$$

Для вимірювання рівнів несиметрії напруг зворотної та нульової послідовності на затискачах споживачів використовується прилад «Вимірювач несиметрії цифровий 43204».

*Опис приладу «Вимірювач несиметрії цифровий 43204»*

Даний прилад призначений для вимірювання:

- коефіцієнтів зворотної послідовності напруги у відсотках від номінального значення лінійної напруги в трифазних мережах з номінальною лінійною напругою  $3 \times 100 \text{ В}$ ,  $3 \times 380 \text{ В}$ ;

- коефіцієнт нульової послідовності напруги у відсотках від номінального значення;

- сили струму зворотної і нульової послідовності з номінальними значеннями струмів до  $5 \text{ А}$ ;

- фазних кутів зсуву напруг зворотної та нульової послідовності.

Прилад має вихідний аналоговий сигнал (напруга постійного струму  $0 - 5 \text{ В}$ ) пропорційний значенню кожної вимірюваної величини. Прилад може бути застосований при експлуатації мереж трифазного струму.

Діапазони вимірювань, межі допустимих значень абсолютної основної похибки вимірювань вказані в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Технічні характеристики приладу 43204

Вимірювана величина	Діапазон вимірювань	Межа допустимого значення абс. похибки	Те саме для аналогового виходу
Коеф. зворотної чи нульової послідовн. напруг, %	0 – 5	+/- 0,5	+/- 0,5
	0 – 10	+/- 1	+/- 0,5
	0 – 20	+/- 1	+/- 0,25
Сила струму зворотної чи нульової послідовності, А	0 – 0,5	+/- 0,1	+/- 1,0
	0 – 1	+/- 0,2	+/- 1,0
	0 – 2	+/- 0,2	+/- 0,5
Фазовий кут зсуву напруг відносно лінійної напруги АВ, градус.	0 – 360	+/- 9	+/- 0,125
Фазовий кут зсуву напруг відносно фазної напруги А, градусів	0 – 360	+/- 9	+/- 0,125

Кількість розрядів індикації – 3.

Опір навантаження аналогового виходу – не менше 1 кОм.

Прилад має індикації правильності підключення та обриву фаз при вимірюванні коефіцієнтів зворотної і нульової послідовностей.

Сумарна споживана приладом потужність не перевищує 35 ВА.

Схема підключення приладу до мережі приведена на рис. 5.2.

### **Хід роботи**

1. Ознайомитись з методикою проведення вимірювань та аналізу результатів (Додаток Д).

2. Зібрати схему для вимірювання, зображену на рис. 5.2 а.

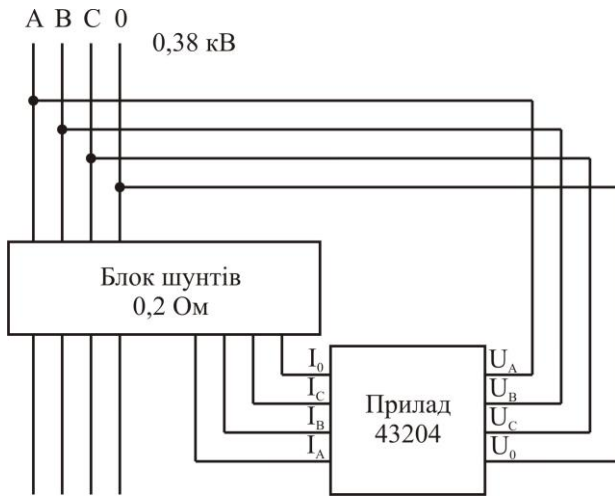
3. Після перевірки зібраної схеми викладачем увімкнути живлення стенду та приладу.

4. В залежності від варіанту провести вимірювання  $K_{2U}$  або  $K_{0U}$ . Рівень навантаження в процесі вимірювання змінюється викладачем. Тривалість вимірювання та інтервал дискретизації згідно варіанту наведено в табл. 5.2. Результати вимірювань оформлюються у вигляді табл. Д.1.

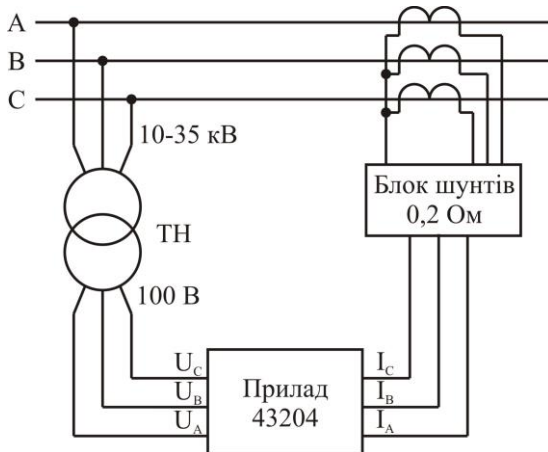
5. Розрахувати ймовірності потрапляння в інтервали  $K_{2U}$  або  $K_{0U}$  а також інтегральну ймовірність (формули (Д.6) – (Д.8)). Кількість інтервалів згідно варіанту вказано в табл. 5.2. Результати розрахунків оформити у вигляді табл. Д.2.

6. Побудувати гістограму зміни  $K_{2U}$  або  $K_{0U}$ .

7. Обчислити основні статистичні характеристики показників якості електричної енергії (формули (Д.9) – (Д.11)). Результати розрахунків оформити у вигляді табл. Д.3.



а)



б)

Рис. 5.2. Схема підключення приладу до мережі  
а) до мережі 0,4 кВ, б) до мережі 10-35 кВ

Таблиця 5.2 – Вихідні дані для розрахунку

№ вар.	Вимірювана величина	Тривалість вимірювання, $T_{\text{вим}}, \text{с}$	Інтервал дискретизації, $\Delta t, \text{с}$	Кількість інтервалів, $N_{\text{інт}}, \text{шт.}$
1	$K_{2U}$	144	3	5
2	$K_{0U}$	192	4	6
3	$K_{2U}$	240	5	7
4	$K_{0U}$	144	3	6
5	$K_{2U}$	192	4	7

### Звіт повинен містити

1. Теоретичні відомості.
2. Вихідні данні кожного з членів бригади.
3. Схеми підключення приладу до мережі 0,4 кВ та 10-35 кВ.
4. Результати вимірювань (табл. Д.1).
5. Результати розрахунків (табл. Д.2, Д.3).
6. Гістограма зміни  $K_{2U}$  або  $K_{0U}$ .
7. Висновки.

### Контрольні запитання

1. Яким чином нормується несиметрія напруги згідно стандарту ДСТУ EN 50160:2014?
2. Який метод вимірювання покладено в основу роботи приладу 43204?
3. Який порядок розрахунку ймовірності потрапляння в інтервал та інтегральної ймовірності  $K_{2U}$  або  $K_{0U}$ ? Суть цих показників.
4. Який порядок побудови гістограми зміни  $K_{2U}$  або  $K_{0U}$ ?
5. Які статистичні показники, що характеризують несиметрію напруги розраховувались в даній роботі? Порядок їх розрахунку.

## Лабораторна робота № 6 ПРИЛАДНИЙ КОНТРОЛЬ НЕСИНУСОЇДАЛЬНОСТІ НАПРУГИ В МЕРЕЖІ

**Мета роботи:** ознайомитися з нормами, що регламентують несинусоїдальність напруги згідно ДСТУ EN 50160:2014; набути практичних навичок вимірювання ПЯЕ несинусоїдальності напруги з допомогою приладу «Аналізатор гармонік електричної мережі цифровий 43250»; набути практичних навичок статистичної обробки результатів вимірювань показників несинусоїдальності напруги.

### Теоретичні відомості

На рис. 6.1 зображено приклад несинусоїдальності форми кривої напруги.

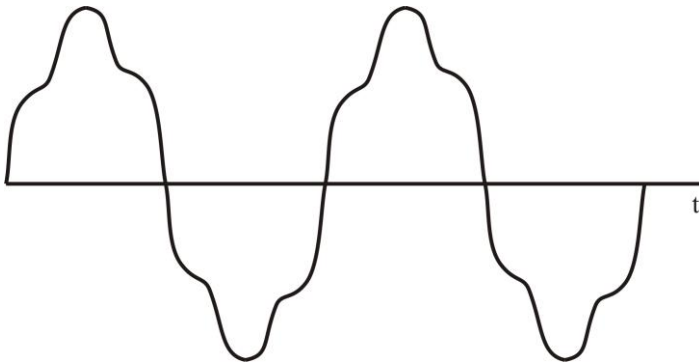


Рис. 6.1. Несинусоїдальність напруги

Згідно ДСТУ EN 50160:2014 за нормальних робочих умов протягом кожного тижневого періоду 95 % середньоквадратичних значень напруги кожної гармоніки, усереднених на 10-ти хвилинному проміжку, мають бути меншими чи рівними значенням, що їх наведено в табл. 6.1. Резонанси можуть спричинювати вищі напруги окремих гармонік.

Окрім того, сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень (СКГС) напруги електропостачання (враховуючи всі гармоніки до 40-ої включно) мають бути меншим чи рівним 8 %.

Таблиця 6.1 – Величини напруг окремих гармонік до 25-го порядку в точках приєднання, у відсотках від напруги першої гармоніки  $U_1$

Непарні гармоніки				Парні гармоніки	
Не кратні 3		Кратні 3			
Порядок, $h$	Відносна амплітуда, $u_h$	Порядок, $h$	Відносна амплітуда, $u_h$	Порядок, $h$	Відносна амплітуда, $u_h$
Мережі напругою до 35 кВ					
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6...24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				
Мережі напругою вище 35 кВ					
5	5 %	3	3 %	2	1,9 %
7	4 %	9	1,3 %	4	1,0 %
11	3 %	15	0,5 %	6...24	0,5 %
13	2,5 %	21	0,5 %		
17	*				
19	*				
23	*				
25	*				

\* - станом на 2023 р. дані значення знаходяться на розгляді

СКГС обчислюють за формулою:

$$\text{СКГС} = \sqrt{\sum_{i=1}^{40} U_i^2}, \quad (6.1)$$

де  $U_i$  – напруга вищої гармоніки (у % від номінального значення).

Вимірювання коефіцієнту  $v$ -ї гармонічної складової напруги  $K_{U_{(n)i}}$  здійснюється для міжфазних (фазних) напруг.

Для кожного  $i$ -го спостереження за період часу, рівний 24 год., визначають діюче значення напруги  $v$ -ї гармоніки  $U_{(v)i}$ , В, кВ.

Обчислюють значення коефіцієнту  $v$ -ї гармонічної складової напруги  $K_{U_{(v)i}}$  у відсотках, як результат  $i$ -го спостереження за формулою:

$$K_{U_{(v)i}} = \frac{U_{(v)i}}{U_{(1)i}}, \quad (6.2)$$

де  $U_{(1)i}$  – діюче значення напруги основної частоти на  $i$ -му спостереженні, В, кВ.

Допускається обчислювати даний показник якості електроенергії за формулою

$$K_{U_{(v)i}} = \frac{U_{(v)i}}{U_{\text{ном}}}. \quad (6.3)$$

Відносна похибка обчислення  $K_{U_{(v)i}}$  з використанням формули (6.3) замість формули (6.2) чисельно дорівнює значенню відхилення напруги  $U_{(1)i}$  від  $U_{\text{ном}}$ .

Обчислюють значення коефіцієнту  $v$ -ї гармонічної складової напруги  $K_{U_{(v)}}$  у відсотках як результат усереднення  $N$  спостережень  $K_{U_{(v)i}}$  на інтервалі часу  $T_{vs}$ , рівному 3 с за формулою:

$$K_{U_{(v)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{U_{(v)i}}^2}{N}}. \quad (6.4)$$

Число спостережень повинно бути не менш, ніж 9.

Вимірювання коефіцієнту спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_U$  здійснюється для міжфазних (фазних) напруг.

Для кожного  $i$ -го спостереження за встановлений період часу визначають діюче значення гармонічних складових в діапазоні гармонік від 2-ї до 40-ї, В, кВ.

Обчислюють значення коефіцієнту спотворення синусоїдальності форми кривої напруги  $K_{Ui}$  у відсотках як результат  $i$ -го спостереження за формулою:

$$K_{Ui} = \frac{\sqrt{\sum_{v=1}^{40} U_{(v)i}^2}}{U_{(1)i}} \cdot 100, \quad (6.5)$$

де  $U_{(1)i}$  – діюче значення міжфазної (фазної) напруги основної частоти для  $i$ -го спостереження, В, кВ.

При визначенні  $K_{Ui}$  допускається:

1. Не враховувати гармонічні складові, значення яких менші 0,1 %.
2. Обчислювати даний ПЯЕ за формулою:

$$K_{Ui} = \frac{\sqrt{\sum_{v=1}^{40} U_{(v)i}^2}}{U_{ном}} \cdot 100. \quad (6.6)$$

Відносна похибка визначення  $K_{Ui}$  з використанням формули (6.6) замість формули (6.5) чисельно дорівнює значенню відхилення напруги  $U_{(1)i}$  від  $U_{ном}$ .

Обчислюють значення коефіцієнту спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_U$  у відсотках як результат усереднення  $N$  спостережень  $K_{Ui}$  на інтервалі часу  $T_{vs}$ , рівному 3 с, за формулою:

$$K_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{Ui}^2}{N}} \quad (6.7)$$

Для вимірювання  $K_U$  і  $K_{U(v)}$  на затискачах споживачів використовується прилад «Аналізатор гармонік електричної мережі цифровий 43250».

*Опис приладу «Аналізатор гармонік електричної мережі цифровий 43250»*

Даний прилад вимірює:

- коефіцієнт несинусоїдальності кривої напруги;
- відносні рівні кожної із 39-ти вищих гармонік струму і напруги відносно нормованого максимального значення струму і напруги основної частоти;
- фази струму і напруги вищих гармонік.

Аналізатор забезпечує вивід інформації про величину коефіцієнта несинусоїдальності кривої напруги, про фази струму і напруги для реєстрації самописцями постійного струму, що працюють в діапазоні 0 – 5 В, з вхідним опором не менше 1 кОм.

Прилад працює від мережі з поточною напругою 176 – 250 В і частотою 49,5 – 50,5 Гц.

Основні технічні характеристики приладу:

1. Номінальні значення напруг мережі: 58, 100, 220, 380 В.
2. Нормоване максимальне значення струму мережі 5 А.
3. Діапазон досліджуваних напруг електричної мережі: 46,2 – 69,6; 80 – 120; 176 – 164; 304 – 456 В.
4. Діапазон досліджуваного струму електричної мережі : 0 -5 А.
5. Частота досліджуваних струму або напруги електричної мережі 48,8 – 50,5 Гц.
6. Аналоговий вивід інформації про значення коефіцієнта несинусоїдальності виводиться у вигляді сигналу постійного струму в діапазоні 0 – 5 В.
7. Опір навантаження аналогового виходу не менше 1 кОм.

8. Потужність, споживана аналізатором від досліджуваної мережі не більше 5 ВА.

9. Потужність, споживана аналізатором від мережі живлення не більше 100 ВА.

10. Час встановлення робочого режиму не більше 15 хв.

11. Час безперервної роботи аналізатора – 72 год з подальшою перервою до наступного включення 1 год.

12. Середнє напрацювання на відмову – 6000 год.

Схема підключення приладу до мережі приведена на рис. 6.2.

### Хід роботи

1. Ознайомитись з методикою проведення вимірювань та аналізу результатів (Додаток Д).

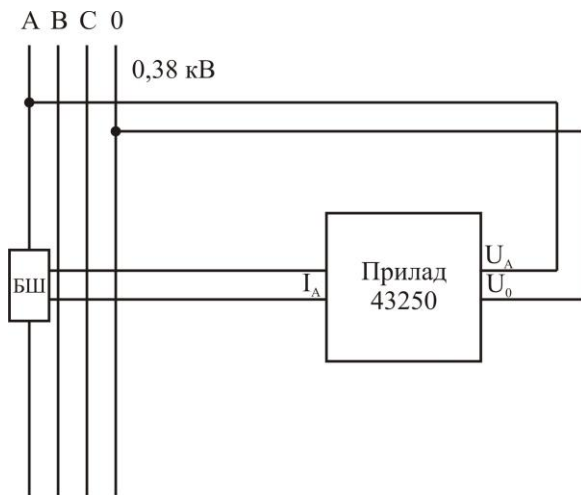
2. Зібрати схему для вимірювання, зображену на рис. 6.2 а.

3. Після перевірки зібраної схеми викладачем увімкнути живлення стенду та живлення приладу.

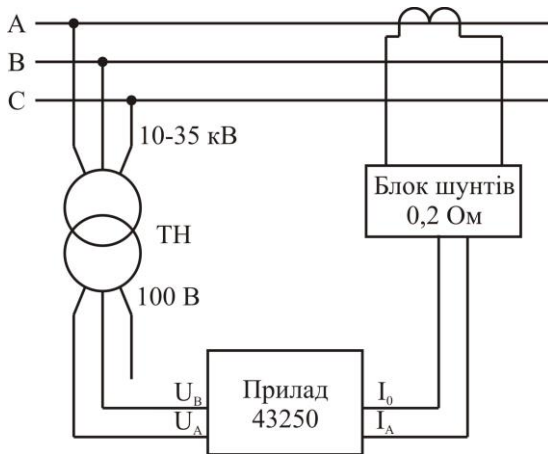
4. Провести вимірювання  $K_U$ . Рівень навантаження в процесі вимірювання змінюється викладачем. Тривалість вимірювання та інтервал дискретизації згідно варіанту наведено в табл. 6.2. Результати вимірювань оформлюються у вигляді табл. Д.1.

Таблиця 6.2 – Вихідні дані для розрахунку

№ варіанту	Тривалість вимірювання, $T_{\text{вим}}, \text{с}$	Інтервал дискретизації, $\Delta t, \text{с}$	Кількість інтервалів, $N_{\text{інт}}, \text{шт.}$
1	144	3	7
2	192	4	6
3	240	5	8
4	144	3	7
5	192	4	6



а)



б)

Рис. 6.2. Схема підключення приладу до мережі  
а) до мережі 0,4 кВ, б) до мережі 10-35 кВ

5. Розрахувати ймовірності потрапляння в інтервали  $K_U$ , а також інтегральну ймовірність (формули (Д.6) – (Д.8)). Кількість інтервалів згідно варіанту вказано в табл. 6.2. Результати розрахунків оформити у вигляді табл. Д.2.

6. Побудувати гістограму зміни  $K_U$ .

7. Обчислити основні статистичні характеристики показників якості електричної енергії (формули (Д.9) – (Д.11)). Результати розрахунків оформити у вигляді таблиці Д.3.

### **Звіт повинен містити**

1. Теоретичні відомості.
2. Вихідні данні кожного з членів бригади.
3. Схеми підключення приладу до мережі 0,4 кВ та 10-35 кВ.
4. Результати вимірювань (табл. Д.1).
5. Результати розрахунків (табл. Д.2, Д.3).
6. Гістограма зміни  $K_{2U}$  або  $K_{0U}$ .
7. Висновки.

### **Контрольні запитання**

1. Яким чином нормується несинусоїдальність напруги згідно ДСТУ EN 50160:2014?

2. Який метод вимірювання покладено в основу роботи приладу 43250?

3. Який порядок розрахунку ймовірності потрапляння в інтервал та інтегральної ймовірності  $K_U$ ? Суть цих показників.

4. Який порядок побудови гістограми зміни  $K_U$ ?

5. Які статистичні показники, що характеризують несинусоїдальність напруги розраховувались в даній роботі? Порядок їх розрахунку.

6. Які прилади використовуються для контролю несинусоїдальності напруги?

## Лабораторна робота № 7

### ПРИЛАДНИЙ КОНТРОЛЬ ВІДХИЛЕННЯ ЧАСТОТИ В МЕРЕЖІ

**Мета роботи:** ознайомитися з нормами, що регламентують відхилення частоти напруги згідно ДСТУ EN 50160:2014, набутти практичних навичок вимірювання відхилення частоти напруги з допомогою електронного частотоміру; набутти практичних навичок статистичної обробки результатів вимірювань відхилення частоти напруги.

#### Теоретичні відомості

Згідно ДСТУ EN 50160:2014 встановлено наступні норми відносно частоти напруги.

Номінальна частота напруги в електричних мережах повинна бути 50 Гц.

Для мереж до 1 кВ за нормальних робочих умов середнє значення частоти основного складника напруги, яку виміряно на проміжку 10 с, має бути в межах:

- для систем, які синхронно підключено до об'єднаної енергосистеми:  $50 \text{ Гц} \pm 1\%$  (49,5 Гц...50,5 Гц) протягом 99,5 % часу за рік;  $50 \text{ Гц} + 4\% / -6\%$  (47 Гц...52 Гц) протягом 100 % часу вимірювання;

- для мереж без синхронного підключення до об'єднаної енергосистеми (тобто для електропостачальних систем типу енергетичний острів):  $50 \text{ Гц} \pm 2\%$  (49 Гц...51 Гц) протягом 95 % часу за тиждень;  $50 \text{ Гц} \pm 15\%$  (тобто 42,5 Гц...57,5 Гц) протягом 100 % часу вимірювання.

Для мереж напругою вище 1 кВ за нормальних робочих умов середнє значення частоти основного складника напруги, яку виміряно на проміжку 10 с, має бути в межах;

- для систем, які синхронно підключено до об'єднаної енергосистеми:  $50 \text{ Гц} \pm 1\%$  (49,5 Гц...50,5 Гц) протягом 99,5 % часу за рік;  $50 \text{ Гц} + 4\% / -6\%$  (47 Гц...52 Гц) протягом 100 % часу вимірювання;

- для мереж без синхронного підключення до об'єднаної енергосистеми (тобто для електропостачальних систем типу енергетичний острів):  $50 \text{ Гц} \pm 2\%$  (49 Гц ...51 Гц) протягом 95 % часу за тиждень;  $50 \text{ Гц} \pm 15\%$  (42,5 Гц...57,5 Гц) протягом 100 % часу вимірювання.

Вимірювання відхилення частоти  $\Delta f$  здійснюють наступним чином.

1. Для кожного  $i$ -го спостереження за встановлений період часу вимірюють дійсне значення частоти  $f_i$  в Гц.

2. Далі обчислюють усереднене значення частоти  $f_y$  в Гц як результат усереднення  $N$  спостережень  $f_i$  на інтервалі часу, рівному 20 с, по формулі:

$$f_y = \frac{\sum_{i=1}^N f_i}{N}. \quad (7.1)$$

Число спостережень  $N$  повинно бути не меншим за 15.

3. Обчислюють значення відхилення частоти  $\Delta f$  в герцах по формулі:

$$\Delta f = f_y - f_{\text{ном}}, \quad (7.2)$$

где  $f_{\text{ном}}$  – номінальне значення частоти, Гц.

В даній лабораторній роботі вимірювання частоти проводиться цифровим частотоміром. Описання приладу, а також програмного забезпечення до нього наведено в Додатку Г.

### **5Хід роботи**

1. Ознайомитись з описанням цифрового частотоміру та програмного забезпечення до нього (Додаток Г).

2. Ознайомитись з методикою проведення вимірювань та аналізу результатів (Додаток Д).

3. Приєднати кабель передачі даних до СОМ порту ПК. Живлення ПК та приладу при цьому повинно бути вимкнене.

4. Увімкнути живлення приладу та ПК. Після завантаження операційної системи запустити програму «Freg».

5. Вибрати СОМ порт, до якого приєднано прилад. Для цього необхідно натиснути *Файл – Опції* і у вікні налаштувань, що з'явилося, із пунктів випадаючого списку «Port» обрати необхідний СОМ порт комп'ютера.

6. Натиснути кнопку «Старт». Тривалість вимірювання згідно варіанту приведена в табл. 7.1.

Таблиця 7.1 – Вихідні дані для розрахунку

№ варіанту	Тривалість вимірювання, $T_{\text{вим}}, \text{с}$	Кількість інтервалів, $N_{\text{інт}}, \text{шт.}$
1	40	6
2	45	7
3	50	8
4	55	6
5	60	7

7. Після закінчення вимірювань натиснути кнопку «Стоп» та зберегти результати у файл.

8. Закрити програму «Freg». Запустити табличний процесор Microsoft Excel. Натиснути *Файл – Імпорт* і у вікні, що з'явилося, обрати файл зі збереженими даними вимірювань.

9. З допомогою табличного процесора розрахувати відхилення частоти та ймовірності потрапляння в інтервали  $\Delta f$ , а також інтегральну ймовірність (формули (Д.6) – (Д.8)). Кількість інтервалів згідно варіанту вказано в табл. 7.1. Результати розрахунків оформити у вигляді табл. Д.2.

10. Побудувати гістограму зміни  $\Delta f$ .

11. Обчислити основні статистичні характеристики відхилення частоти (формули (Д.9) – (Д.11)). Результати розрахунків оформити у вигляді табл. Д.3.

### **Звіт повинен містити**

1. Теоретичні відомості.
2. Вихідні данні кожного з членів бригади.
3. Результати вимірювань (табл. Д.1).
4. Результати розрахунків (табл. Д.2, Д.3).
5. Гістограма зміни  $\Delta f$ .
6. Висновки.

### Контрольні запитання

1. Яким чином нормується відхилення частоти напруги в мережах згідно ДСТУ EN 50160:2014?
2. Поясніть принцип роботи цифрового частотоміру.
3. Який порядок розрахунку ймовірності потрапляння в інтервал та інтегральної ймовірності  $\Delta f$  ? Суть цих показників.
4. Який порядок побудови гістограми зміни  $\Delta f$  ?

## **Лабораторна робота № 8**

### **ВИМІРЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ З ДОПОМОГОЮ ЦИФРОВОГО МУЛЬТИМЕТРУ DMK-32**

**Мета:** ознайомитися з основними функціями та схемою підключення цифрового мультиметру DMK-32; навчитися проводити вимірювання параметрів режиму роботи СЕП з допомогою цифрового мультиметру DMK-32; навчитися обробляти результати вимірювань параметру режиму та визначати на їх основі значення ПЯЕ.

#### **Теоретичні відомості**

Світова промисловість випускає широкий спектр приладів для вимірювання якості електричної енергії. На відміну від приладів, описаних в роботах 4 – 6, ці прилади є аналізаторами якості електричної мережі, тобто вимірюють декілька ПЯЕ одночасно. Також до переваг даних приладів можна віднести компактність, зручність у використанні, наявність великого обсягу пам'яті, інтеграція з ПК. Але основним недоліком, що стримує розповсюдження їх на підприємствах України, є їх висока вартість.

Для вимірювання ПЯЕ також можна використовувати неспеціалізовані засоби. До них можна віднести вимірювачі струму та напруги, частотоміри, осцилографи та ін. В такому випадку значення ПЯЕ визначається на основі результатів вимірювання режимних параметрів (струм, напруга, частота). Прикладом застосування неспеціалізованих приладів для вимірювання ПЯЕ є графоаналітичний аналіз осцилограм напруги, описаний в лабораторній роботі № 1. Даний спосіб вимірювання ПЯЕ має ряд переваг та недоліків.

Досить зручним неспеціалізованим засобом вимірювання ПЯЕ є цифровий мультиметр Lovato DMK-32, зовнішній вигляд якого приведено на рис. 8.1.

До основних переваг даного приладу можна віднести:

- невеликі розміри 96 x 96 мм;
- енергонезалежна пам'ять;
- легко встановлюється та конфігурується;
- вимірювання значень RMS;



Рис. 8.1. Зовнішній вигляд приладу Lovato DMK-32

- більш як 230 зчитуваних параметрів з функціями аналізатора потужності;
- вимірювання гармонік напруги та струму до 22-ї гармоніки;
- запам'ятовування максимальних та мінімальних значень;
- вимірювання споживаної і генерованої потужності – функція лічильника;
- одночасна індикація величин по трьом фазам.
- інтеграція з ПК по інтерфейсу RS-485.

Схеми підключення приладу можуть бути різними: їх можна встановлювати на вводах 0,4 кВ, 6 кВ, 10 кВ або на фідері, параметри навантаження якого необхідно виміряти.

Схема підключення приладу до мережі 0,4 кВ приведена рис. 8.2.

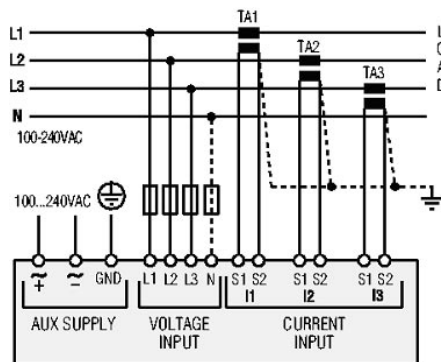


Рис. 8.2. Схема підключення приладу DMK-32 до мережі 0,4 кВ

В комплект приладу також входить програмне забезпечення дистанційного керування приладом. Головне вікно програми дистанційного керування приведене на рис. 8.3.

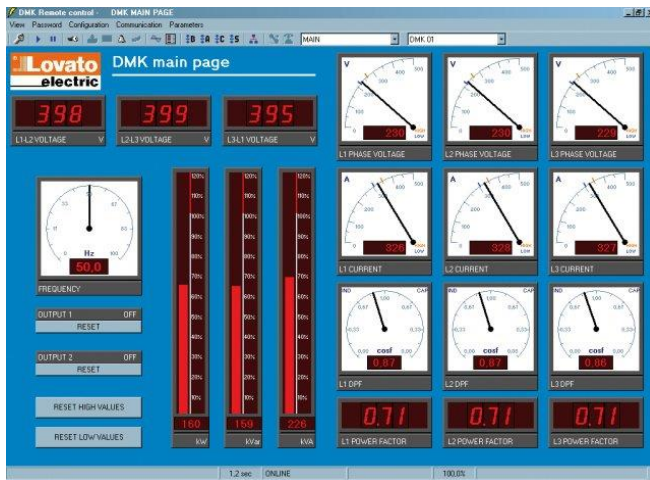


Рис. 8.3. Головне вікно програми

Програмне забезпечення дистанційного керування приладом дозволяє виконувати наступне:

- виведення на екран ПК в графічному вигляді даних вимірювання мультиметру з представленням віртуальних приладів (вимірювальних засобів, гістограм, лічильників та ін.);
- періодичне виконання заданого користувачем комплексу вимірювань і збереження отриманих даних на диск в різних форматах (MS-Access, ASCII, MS-Excel);
- періодичне зняття показань лічильника електроенергії DMK і занесення їх в базу даних. Автоматичний розрахунок енергоспоживання між вибірками по їх закінченню;
- побудова графіків вимірювань;
- призначення граничних значень вимірюваних величин для подачі тривоги та ін.

В даній лабораторній роботі необхідно з допомогою цифрового мультиметра DMK-32 виміряти параметри режиму, обрахувати на основі вимірювань значення ПЯЕ та провести їх статистичну обробку.

### Хід роботи

1. Ознайомитися з технічним описом DMK-32.
  2. Ознайомитися з описом програмного забезпечення для приладу DMK-32.
  3. Ознайомитись з методикою проведення вимірювань та аналізу результатів (Додаток Д).
  3. Схему живлення приладу.
  4. Увімкнути ПК та завантажити програму «DMK Remote Control».
  5. В головному меню програми обрати пункт «Password» і в діалоговому вікні вводу пароля, що з'явилося набрати «Lovato» (це пароль за замовчуванням; якщо він недейсний, то його було змінено, в такому разі необхідно звернутися до викладача). Тепер пункт головного меню «Configuration» став доступним.
  6. Натиснути Configuration – Options. У вікні, що з'явилося, необхідно обрати вкладку «Data log» (рис. 8.4).
  7. Періоди вимірювань необхідно обрати наступним чином:
    - *Sampling period* – часовий інтервал між вибіркою реєстрації даних та перевіркою оповіщення (інтервал дискретизації  $\Delta t$ , с) обрати рівним 1 с;
    - *Storing period* – інтервал між занесенням реєстраційних вибірок в базу даних – обрати рівним 1 с;
- За таких налаштувань прилад буде вимірювати та заносити до бази даних результати вимірювань один раз на секунду.
8. Обрати параметри, вимірювання яких необхідно заносити до бази даних. Для цього у випадяючому списку «Select meashure» («Обрати величину») необхідно вибрати необхідний параметр і натиснути кнопку «Add» («Додати»). Назва даного параметру з'явиться в таблиці, розташованій нижче у вікні. Таким чином для реєстрації необхідно обрати

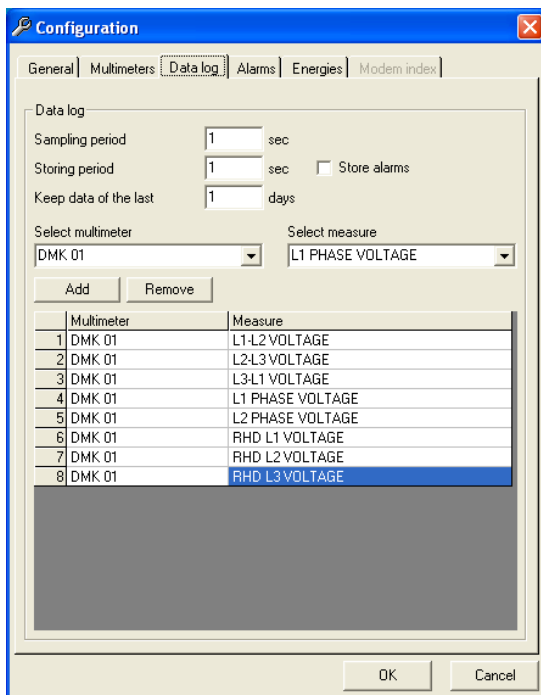



Рис. 8.4. Вікно конфігурації приладу

наступні параметри:

1. Лінійна напруга  $U_{AB}$  – L1-L2 VOLTAGE.
2. Лінійна напруга  $U_{BC}$  – L2-L3 VOLTAGE.
3. Лінійна напруга  $U_{CA}$  – L3-L1 VOLTAGE.
4. Фазна напруга  $U_A$  – L1 PHASE VOLTAGE.
5. Фазна напруга  $U_B$  – L2 PHASE VOLTAGE.
6.  $K_U$  фази А – RHD L1 VOLTAGE.
7.  $K_U$  фази В – RHD L2 VOLTAGE.
8.  $K_U$  фази С – RHD L3 VOLTAGE.

Після встановлення параметрів натиснути кнопку ОК.

9. Натиснути кнопку . З'явиться вікно з таблицею бази даних реєстрованих величин.

10. Провести вимірювання обраних параметрів (фактично, воно розпочнеться після натискання кнопки ОК меню конфігурації). Тривалість вимірювання згідно варіанту задано в табл. 8.2. Рівень навантаження задається викладачем.

Таблиця 8.2 – Вихідні дані для розрахунку

№ варіанту	Тривалість вимірювання, $T_{\text{вим}}, \text{с}$	Кількість інтервалів, $N_{\text{інт}}, \text{шт.}$
1	60	6
2	120	7
3	240	8
4	360	9
5	480	10

11. Після закінчення вимірювань натиснути кнопку «Export». У вікні збереження файлу ввести ім'я файлу з даними і обрати тип файлу «Excel \*.xls» – файл Microsoft Excel.

12. Відкрити файл з результатами вимірювань з допомогою Microsoft Excel. Привести таблицю до вигляду табл. 8.3.

Таблиця 8.3. – Результати вимірювань параметрів мережі

№ вим.	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$U_A$	$U_B$	$K_{U(A)}$	$K_{U(B)}$	$K_{U(C)}$

13. Створити в новому листі таблицю вигляду 8.4 та розрахувати з допомогою табличного процесора Excel величини, зазначені в цій таблиці.

Таблиця 8.4. – Результати розрахунку ПЯЕ

№ вим.	$U_{1(1)i}$	$\delta U_i$	$U_{2(1)i}$	$K_{2U_i}$	$U_{0(1)i}$	$K_{0U_i}$

Формули для розрахунку величин табл. 8.4:

- $U_{1(1)i}$  – формула (4.1) або (4.2);
- $\delta U_i$  – формула (4.4). Замість  $U_y$  в формулу підставити  $U_{1(1)i}$ ;
- $U_{2(1)i}$  – формула (5.1) або (5.3);
- $K_{2U_i}$  – формула (5.2) або (5.4);
- $U_{0(1)i}$  – формула (5.6) або (5.8);
- $K_{0U_i}$  – формула (5.7) або (5.9).

14. Розрахувати ймовірності потрапляння ПЯЕ згідно варіанту а також інтегральну ймовірність (формули (Д.6) – (Д.8) з допомогою табличного процесора Microsoft Excel. Кількість інтервалів згідно варіанту вказано в табл. 8.2. Результати розрахунків оформити у вигляді табл. Д.2.

15. Побудувати гістограми зміни ПЯЕ з допомогою табличного процесора Microsoft Excel.

16. Обчислити основні статистичні характеристики показників якості електричної енергії (формули (Д.9) – (Д.11) з допомогою табличного процесора Microsoft Excel. Результати розрахунків оформити у вигляді табл. Д.3.

### **Звіт повинен містити**

1. Вихідні дані кожного з членів бригади.
2. Схеми підключення приладу до мережі 0,4 кВ.
3. Результати вимірювань.
4. Результати розрахунків.
5. Гістограму зміни  $K_{U(A)}$ ,  $K_{U(B)}$ ,  $K_{U(C)}$ ,  $\delta U$ ,  $K_{2U}$  та  $K_{0U}$ .
6. Висновки.

### **Контрольні запитання**

1. Які параметри режиму роботи мережі може вимірювати цифровий мультиметр DMK-32?

2. Які показники якості можна визначити за результатами вимірювання параметрів режиму мультиметром DMK-32?

3. Чи відповідає даний прилад вимогам ДСТУ EN 50160:2014 щодо вимірювання значень показників якості електричної енергії? Якщо ні, то чому?

4. Які функції виконує програма дистанційного керування приладом DMK-32?

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності: ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IKT). [Чинний з 1.10.2014]. - К.: Держстандарт України, 2014. – 27 с.

2. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання: Підручник / І.В. Жежеленко, А.К. Шидловський, Г.Г. Півняк, Ю.Л. Саєнко. - Д, Нац. гірнич. ун-т, 2009. – 319 с.

3. Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 310 «Про затвердження Кодексу системи розподілу».

Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18/print>

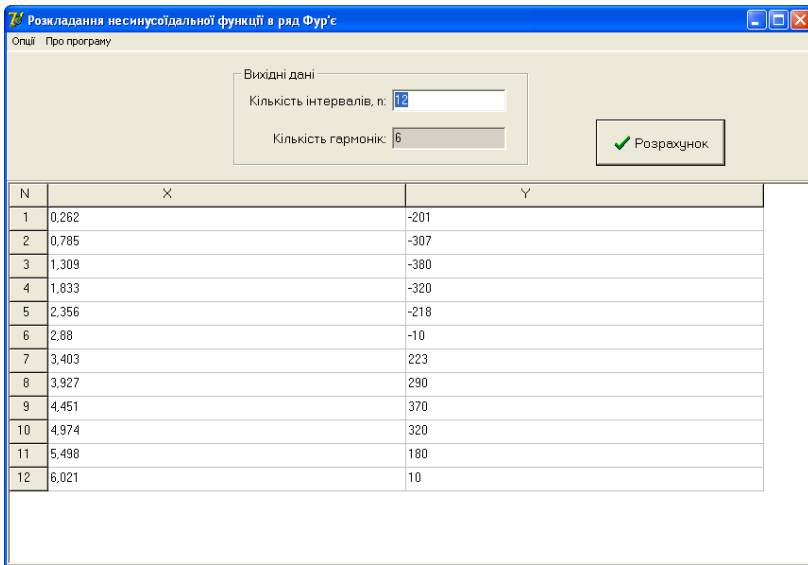
4. Шкрабець Ф.П., Плешков П.Г. Основи електропостачання. Навчальний посібник. – Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2010, – 408 с.

5. Dugan R.C., McGranaghan M.F., Santoso S., Beaty W.H. Electrical Power System Quality. - McGraw-Hill.-2004 – 521 с.

## ДОДАТКИ

### Додаток А. Опис програми «Fourier»

Програма «Fourier» призначена для проведення спектрального аналізу осцилограми напруги або струму. В основу її покладено алгоритм перетворення Фур'є, який детально описаний в роботі № 1. Головне вікно програми зображено на рис. А.1.



Розкладання несинусоїдальної функції в ряд Фур'є

Опції Про програму

Вихідні дані

Кількість інтервалів, n:

Кількість гармонік:

N	X	Y
1	0,262	-201
2	0,785	-307
3	1,309	-380
4	1,833	-320
5	2,356	-218
6	2,88	-10
7	3,403	223
8	3,927	290
9	4,451	370
10	4,974	320
11	5,498	180
12	6,021	10

Рис. А.1. Головне вікно (вікно вводу даних) програми «Fourier»

В поле «Кількість інтервалів, n» вводиться значення кількості інтервалів, на яку необхідно розбити період для проведення розрахунку. Столпчик «X» містить значення абсцис (в радіанах), що відповідають серединам інтервалів. Столпчик «Y» містить значення ординат (B, A) осцилограми, які відповідають значенням абсцис.

Після введення значення кількості інтервалів та значення ординат (поле «X» заповнюється автоматично) та натискання кнопки «Розрахунок» на екрані з'являється вікно з результатами розрахунку. Воно містить дві вкладки. Вкладка «Результати» містить результати

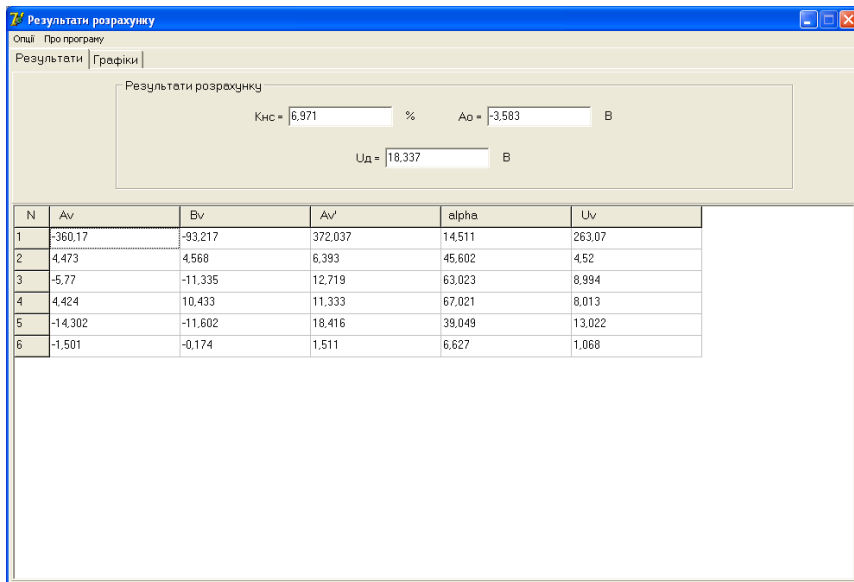


Рис. А.2. Вкладка «Результати» вікна результатів розрахунку

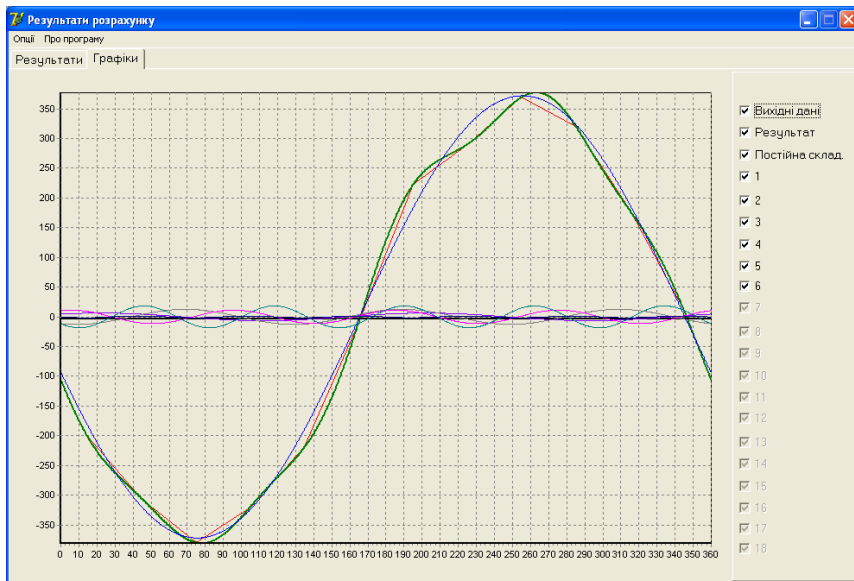


Рис. А.3. Вкладка «Графіки» вікна результатів розрахунку

розрахунку спектру вищих гармонік в цифровому вигляді:

$K_{нс}$  – значення коефіцієнту спотворення синусоїдальності форми кривої напруги (1.16).

$A_0$  – значення постійної складової (1.6).

$U_d$  – діюче значення вищих гармонічних складових (1.15).

В таблиці для кожної з аналізованих гармонік приведені наступні величини:

$A_v$  – амплітудне значення синусної складової вищої гармоніки (1.9);

$B_v$  – амплітудне значення косинусної складової вищої гармоніки (1.10);

$A_v'$  – амплітудне значення вищої гармонічної складової (1.11);

$\alpha$  – початкова фаза (1.13);

$U_v$  – діюче значення вищої гармонічної складової напруги (1.14).

У вкладці «Графіки» приведені графічне відображення кривих:

1 – крива вихідних даних;

2 – результуюча крива;

3 – постійна складова;

4-18 – криві вищих гармонічних складових.

З допомогою перемикачів, які містяться навпроти назви кожної з кривих, можна включати та відключати їх відображення на екрані.

Програма дозволяє виводити на друк вихідні дані для розрахунку, результати розрахунків і графічне відображення результатів розрахунку. Для цього у вікні результатів розрахунку необхідно натиснути «Опції» - «Друк».

Для повернення до головного вікна необхідно закрити вікно розрахунків.

## Додаток Б. Опис програми «FKU»

Програма «FKU» призначена для дослідження несинусоїдальних режимів роботи системи електропостачання.

В якості математичної моделі елементів СЕП (трансформаторів, опору системи, високовольтного та низьковольтного навантаження, БСК, ФКП) обрано лінійну схему заміщення. Нелінійне навантаження моделюється джерелом струму. Опори повітряних та кабельних ліній при розрахунку не враховуються.

Розрахунок режиму проводиться методом накладання.

Головне вікно програми показано на рис. Б.1.

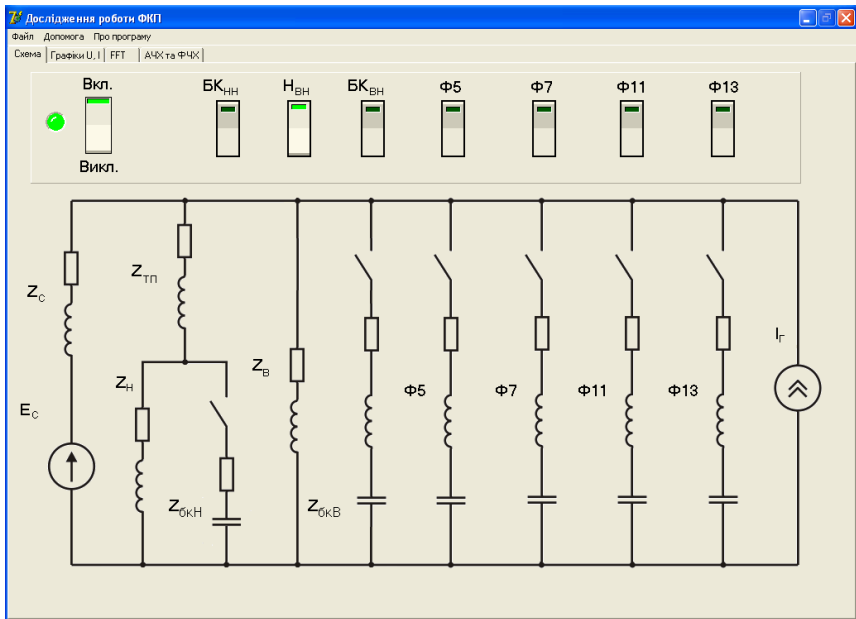


Рис. Б.1. Головне вікно програми «FKU»

В головному вікні програми у вкладці «Схема» зображена схема заміщення електричної мережі, а також елементи керування:

«Вкл./викл.» – кнопка запуску/зупинки моделювання. Якщо процес моделювання запущено, то зміна параметрів електричної мережі неможлива.

- БК<sub>НН</sub> – вимикач низьковольтних батарей конденсаторів;
- Н<sub>ВН</sub> – вимикач високовольтного навантаження;
- БК<sub>ВН</sub> – вимикач високовольтних батарей конденсаторів;
- Ф5, Ф7, Ф11, Ф13 – вимикачі ФКП 5, 7, 11, 13 гармонік відповідно.

Для встановлення параметрів елементів моделі необхідно натиснути ліву кнопку мишки на зображенні елемента, параметри якого потрібно встановити (змінити). При цьому зображення даного елемента змінить колір на червоний а на екрані з'явиться діалогове вікно, в якому необхідно ввести нові параметри елемента.

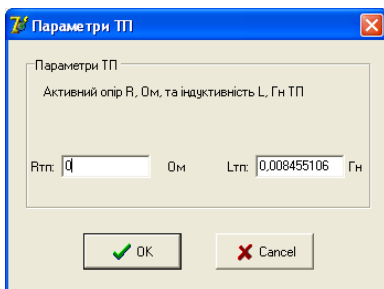


Рис. Б.2. Діалогове вікно вводу параметрів елемента СЕП

Параметри елементів моделі задаються у В, А, Ом, Гн, Ф. Для встановлення параметрів необхідно, щоб процес моделювання був зупинений.

Вкладка «Графіки U, I» (рис. Б.3) містить графічне відображення (осцилограми) напруг (вкладка «Напруга») та струмів (вкладка «Струм») схеми.

Вибір осцилограми напруги у вкладці «Напруга» відбувається з допомогою випадаючого списку:

- U<sub>нв</sub> – напруга на шинах ВН ГЗП (ЦРП);

-  $U_{нн}$  – напруга на шинах 0,4 кВ цехових ТП, приведена до сторони ВН.

Аналогічно проводиться вибір осцилограми струму у вкладці «Струм»:

- $I_c$  – струм гілки опору системи;
- $I_{тп}$  – струм гілки ТП;
- $I_n$  – струм гілки навантаження цехових ТП;
- $I_v$  – струм гілки високовольтного навантаження;
- $I_{бн}$  – струм гілки низьковольтних БСК;
- $I_{бв}$  – струм гілки високовольтних БСК;
- $I_{ф5}$  – струм гілки ФКП 5-ї гармоніки;
- $I_{ф7}$  – струм гілки ФКП 7-ї гармоніки;
- $I_{ф11}$  – струм гілки ФКП 11-ї гармоніки;
- $I_{ф13}$  – струм гілки ФКП 13-ї гармоніки;

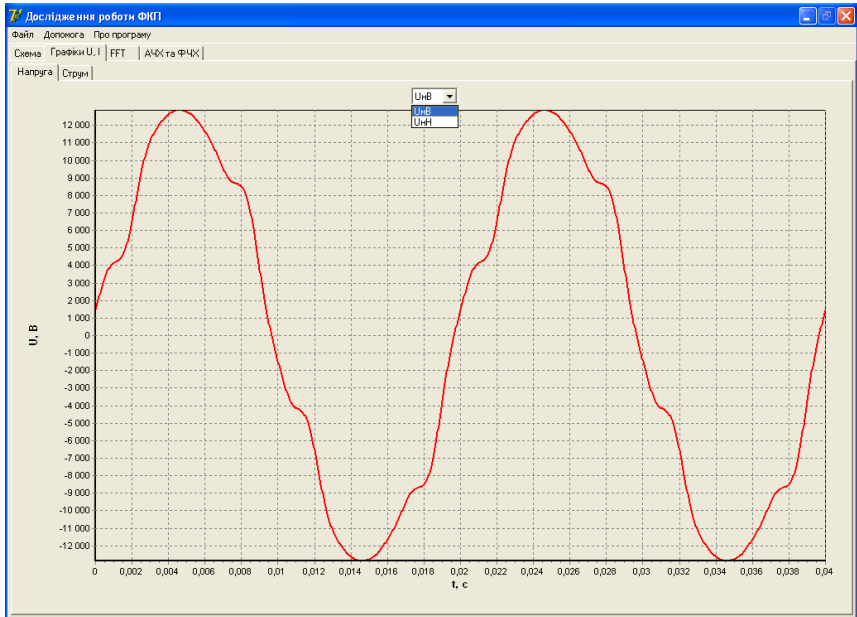


Рис. Б.3. Вікно виводу осцилограм струмів та напруг.

Вкладка «FFT» (рис. Б.4) містить результати спектрального аналізу напруги (вкладка «Напруга») та струму (вкладка «Струм»), приведені у вигляді гістограм рівнів вищих гармонік у відсотках відносно основної гармоніки напруги або струму.

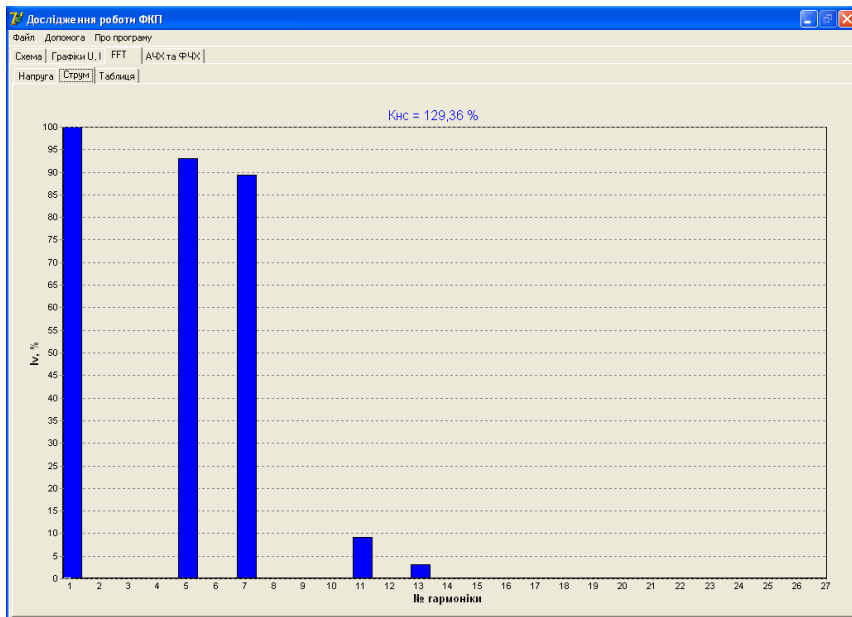


Рис. Б.4. Вікно результатів спектрального аналізу кривої напруги (струму)

В даних вкладках також відображається значення коефіцієнту спотворення синусоїдальності напруги або струму  $K_{нс}$ , %. У вкладці «Таблиця» в табличному вигляді приведені комплексні значення рівнів вищих гармонік напруг та струмів схеми. Гістограми рівнів вищих гармонік струму та напруги відображаються в цих вкладках для тих струмів і напруг, для яких були побудовані осцилограми напруги і струму у вкладці «Графіки U, I».

Вкладка «АЧХ та ФЧХ» (рис. Б.5) містить графічне відображення амплітудо-частотної характеристики (вкладка «АЧХ») та фазочастотної характеристики (вкладка «ФЧХ») системи електропостачання. З допомогою цих графіків можна визначити при яких значеннях потужності

батареї конденсаторів 0,4 кВ і 10 кВ можливий резонанс в СЕП, частоти цього резонансу.

Програма дозволяє виводити осцилограми напруг та струмів, результати їх спектрального аналізу, рівні вищих гармонік струму і напруги на друк. Для цього необхідно натиснути «Файл» – «Друк» і обрати необхідний підпункт головного меню.

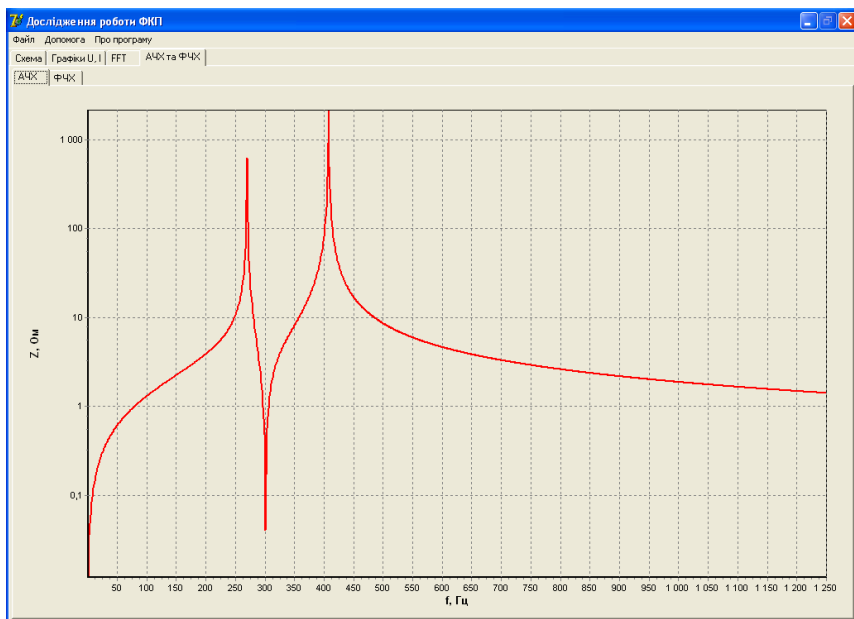


Рис. Б.5. Вікно графічного відображення АЧХ та ФЧХ

## Додаток В. Технічні дані ФКП

Таблиця В.1 – Технічні дані ФКП

№ гармоніки	Номинальна потужність, кВАр	Компенсуюча здатність, кВАр	Добротність на резонансній частоті (біля)	Струм, А			
				Номинальний		Тривало допустимий	
				повний	резонансної частоти	повний	резонансної частоти
5	1200	1000	40	60	30	79	55
	1600	1350		80	40	105	75
	2400	2000		120	60	155	110
7	1200	965	35	60	30	79	55
	1600	1290		80	40	105	75
	2400	1930		120	60	155	110
11	800	625	25	40	20	52	38
	1600	1250		80	40	105	75
	2400	1890		120	60	155	110
13	800	625	20	40	20	52	38
	1600	1220		80	40	105	75
	2400	1845		120	60	155	110

## Додаток Г. Опис цифрового частотоміра та програми обробки даних «Freq»

Принципова схема цифрового частотоміра приведена на рис. Г.1.

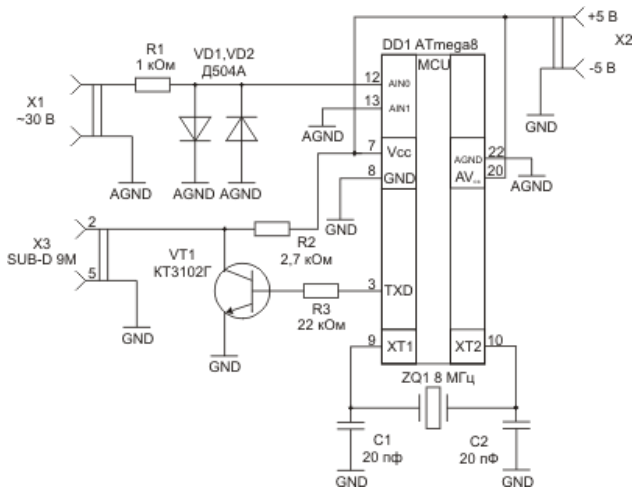


Рис. Г.1. Принципова схема цифрового частотоміра

Основним елементом частотоміра є мікроконтролер (МК) ATmega8 DD1, формувач прямокутних імпульсів R1, VD1, VD2 та перетворювач рівня сигналу RS232 R2, VT1, R3. З периферійних пристроїв МК використані:

- аналоговий компаратор для відстеження моменту переходу напруги через нуль;
- таймер-лічильник TC1 для обчислення тривалості періоду;
- модуль USART для передачі виміряного значення періоду до комп'ютера.

Пристрій працює наступним чином. Після подачі живлення до МК в ньому відбувається запуск програми, яка ініціює периферійні пристрої та входить до основного нескінченного циклу, що включає лише очікування переривань від аналогового компаратора МК. Формувач прямокутних імпульсів перетворює синусоїдальний сигнал мережевої напруги в

послідовність прямокутних імпульсів з амплітудою  $\approx 0,5$  В, яка подається до виводу AIN0 аналогового компаратора для порівняння. При прикладеній додатній напрузі відносно AGND на виводі AIN0 більшій ніж прикладена до виводу AIN1 аналоговий компаратор видає логічну одиницю та формує запит на переривання МК по факту зміни „0” на „1”. Після формування запиту на переривання МК за два такти переходить до підпрограми обробки переривання. Вона включає зупинку таймера-лічильника TC1, зберігання нарахованого ним значення, обнуління лічильника, запуск з діленням тактової частоти на 8 (в цьому випадку збільшення значення лічильника TC1 відбувається кожену 1 мкс), передача обчисленого значення періоду до комп'ютера через RS232 (швидкість 9600 Бод, вісім інформаційних один стоповий розряд, без контролю парності), вихід з підпрограми обробки переривання.

Для обробки виміряних даних, переданих на ПК, служить програма «Freq». Головне вікно програми приведено на рис. Г.2.

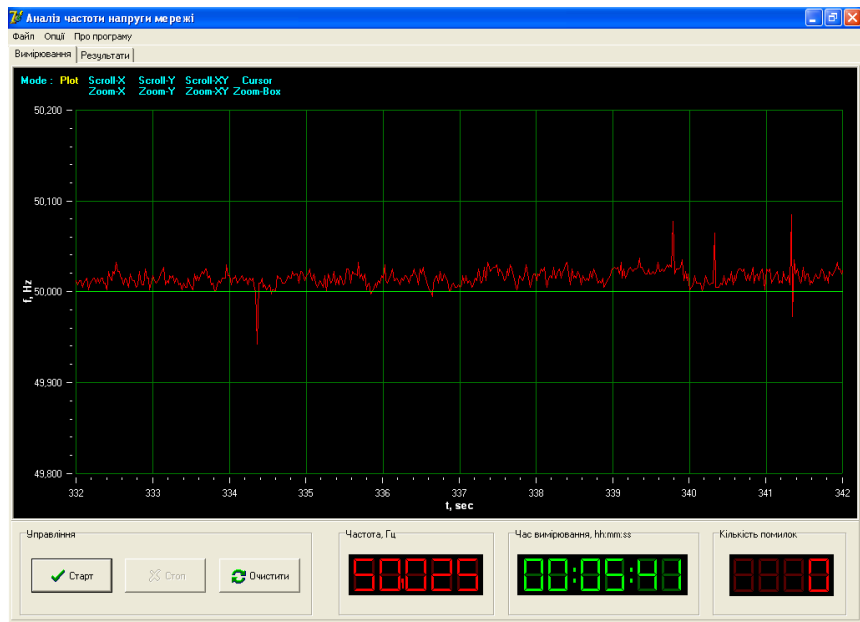


Рис. Г.2. Головне вікно програми «Freq»

Головне вікно програми містить:

- часову діаграму зміни частоти електричної мережі;
- кнопки «Старт», «Стоп», «Очистити» відповідно для початку вимірювання, завершення вимірювання і для очистки результатів;
- відображення поточного значення частоти;
- відображення часу вимірювання;
- відомості про кількість помилок при передачі даних.

Програма дозволяє зберігати результати вимірювань в текстовому файлі. Для цього необхідно натиснути в меню «Файл» вкладку «Зберегти», і у діалоговому вікні, що з'явиться, вказати ім'я файлу.

## Додаток Д. Методика проведення вимірювань та аналізу результатів

Одним з основних питань постановки експлуатаційного контролю ПЯЕ є вибір тривалості вимірювань, інтервалів дискретизації і квантування. При виборі цих величин доцільно визначити їх оптимальне значення, що дозволяє істотно скоротити витрати часу і забезпечити необхідну точність.

Тривалість вимірювань ПЯЕ знаходилася з виразу:

$$T_{\text{вим}} = \frac{2\tau_k V^2}{\Delta^2}, \quad (\text{Д.1})$$

де  $\tau_k$  – інтервал кореляції;

$V$  – коефіцієнт варіації випадкового процесу;

$\Delta$  – середньоквадратична похибка вимірювання.

Інтервал кореляції для нормованої кореляційної функції визначається з виразу:

$$\tau_k = \frac{1}{\alpha(1+m^2)}, \quad (\text{Д.2})$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт загасання кореляційної функції;

$m$  – кратність коефіцієнтів кореляційної функції.

Перетворення безперервної реалізації випадкового процесу включає дискретизацію за часом і рівнем. Інтервал дискретизації вибирається виходячи з необхідної точності опису кореляційної функції при дискретизації випадкового процесу і швидкості запису випадкового процесу. Інтервал дискретизації (квантування) за часом визначають відповідно до теореми В.А. Котельникова:

$$\Delta t = \frac{1}{2F_{\text{max}}}, \quad (\text{Д.3})$$

де  $F_{\max}$  – максимальна частота процесу, що відповідає мінімальному періоду.

$$F_{\max} = \frac{1}{T_{\min}}. \quad (\text{Д.4})$$

Таким чином, при виконанні умови (Д.3) дискретна реалізація міститиме всі частоти і на мінімальний період її зміни припадає два відліки. Безперервна реалізація характеристик ПЯЕ повністю визначається вибірками, взятими з інтервалами  $\Delta t$  і визначається у вигляді послідовності вибірок в дискретні моменти часу  $K\Delta t$  з інтервалом між ними  $\Delta t$ .

Об'єм вибірки істотно впливає на точність визначення імовірнісних характеристик випадкових величин ПЯЕ. Мінімальний об'єм вибірки, який з певною вірогідністю забезпечить задану точність, визначається з формули граничної помилки вибірки:

$$N_{\min} = \frac{t^2 \sigma^2}{\Delta^2}, \quad (\text{Д.5})$$

де  $t$  – коефіцієнт довіри, залежний від того, з якою вірогідністю визначалася гранична помилка (для  $P = 0,95$   $t = 1,96$ );

$\sigma$  – вибіркова дисперсія.

Визначимо оптимальне значення  $T$ ,  $\Delta t$  і  $N_{\min}$  під час контролю ПЯЕ. Виходячи з апріорних даних  $a = 0,002 \text{ с}^{-1}$ ,  $m = 1,5$ .

Розрахуємо по формулі (Д.2) інтервал кореляції для нормованої кореляційної функції ПЯЕ, с:

$$\tau_k = \frac{1}{0,002(1+1,5^2)} = 153,8$$

Оптимальна тривалість вимірювання імовірнісних характеристик при похибці вимірювань  $D = 5\%$  (тобто 0,05) і коефіцієнті варіації  $V = 0,5$  по формулі (Д.1):

$$T_{\text{вим}} = \frac{2 \cdot 153,8 \cdot 0,5^2}{0,05} = 30760 \text{ с} = 512 \text{ хв.}$$

Інтервал дискретизації за часом при  $F_{\text{max}} = 0,001$  Гц визначимо за виразом (Д.3):

$$\Delta t = \frac{1}{2 \cdot 0,001} = 500 \text{ с.}$$

На підставі експериментальних досліджень визначимо  $\sigma$  середньоквадратичне значення ПЯЕ і мінімальний об'єм вибірок ПЯЕ при похибці, рівній 0,5% за виразом (Д.5)

$$N_{\text{min}} = \frac{1,96^2 (1,5 \dots 3)^2}{0,5^2} = 34 \dots 140.$$

Від вибору кроку квантування за рівнем (шкали вимірювань) залежить точність наближення дискретного ряду до безперервної реалізації.

При проведенні експлуатаційного контролю показників якості в електричних мережах тривалість вимірювань обирається в межах  $T_{\text{вим}} = 512$  хв., а інтервал дискретизації  $\Delta t = 500$  с. При виконанні лабораторних робіт, зазвичай, тривалість вимірювань та інтервал дискретизації обираються дещо меншими.

Результати вимірювань показників якості електричної енергії зручно оформлювати у вигляді табл. Д.1.

Таблиця Д.1 – Результати вимірювань ПЯЕ

Номер заміру	Значення ПЯЕ

Оцінка режимів зміни ПЯЕ в системі електропостачання проводиться на основі експериментального матеріалу, в тому числі на основі гістограм зміни ПЯЕ. Гістограма наглядно показує розподіл значень ПЯЕ по інтервалам вимірювань.

Для побудови гістограми необхідно:

1. Обрати кількість інтервалів та визначити ширину кожного з них. Кількість інтервалів обирається довільно. Ширина інтервалу визначається за формулою:

$$B_{\text{інт}} = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{N_{\text{інт}}}, \quad (\text{Д.6})$$

де  $B_{\text{інт}}$  – ширина інтервалу;

$U_{\text{max}}$ ,  $U_{\text{min}}$  – відповідно максимальне та мінімальне значення ПЯЕ за період вимірювання;

$N_{\text{інт}}$  – кількість інтервалів.

2. Обчислити значення середини інтервалу як середнє арифметичне значень початку і кінця інтервалу.

3. Обчислити ймовірність потрапляння значення виміряного ПЯЕ в інтервал

$$P_i = \frac{N_i}{N_{\Sigma}}, \quad (\text{Д.7})$$

де  $P_i$  – ймовірність потрапляння в  $i$ -й інтервал значень ПЯЕ;

$N_i$  – кількість значень ПЯЕ, що потрапляють в  $i$ -й інтервал;

$N_{\Sigma}$  – загальна кількість вимірювань.

4. Обчислити інтегральну ймовірність для даного ПЯЕ.

$$P(i) = P_{i-1} + P_i \quad (\text{Д.8})$$

5. Побудувати гістограму зміни ПЯЕ:

- по осі абсцис відкладаються значення границь кожного з інтервалів (або значення середини інтервалу);

- по осі ординат відкладаються значення ймовірності потрапляння в інтервал значень ПЯЕ для кожного з інтервалів.

Результати розрахунку ймовірностей оформлюють у вигляді табл. Д.2.

Таблиця Д.2 – Результати розрахунку ймовірностей

№ інтервалу	Інтервал ПЯЕ, %	Значення середини інтервалу, %	Ймовірність потрапляння в інтервал, $P$	Інтегральна ймовірність

Графічне відображення гістограм зміни ПЯЕ і основні статистичні характеристики дають відповідь про якість електричної енергії в СЕП.

За гістограмами і таблицями визначаються основні статистичні характеристики показників якості:

1. Математичне очікування, %:

$$M[\delta A] = \sum_{i=1}^n \delta A_i p_i, \quad (Д.9)$$

де  $\delta A_i$  – ширина інтервалу, %;

$p_i$  – ймовірність потрапляння значення ПЯЕ в  $i$ -й інтервал.

$n$  – кількість інтервалів.

2. Дисперсію, %<sup>2</sup>:

$$D = \sum_{i=1}^n (\delta A_i - \bar{\delta A}_i)^2 p_i. \quad (Д.10)$$

де  $\delta A_i$  – ширина  $i$ -го інтервалу;

$\bar{\delta A}_i$  – значення середини інтервалу

3. Середньоквадратичне відхилення, %:

$$\sigma = \sqrt{D}. \quad (Д.11)$$

Результати розрахунків зводяться в табл. Д.3.

Таблиця Д.3 – Результати розрахунків статистичних показників

Основні статистичні характеристики	ПЯЕ
Математичне очікування $M[\delta A]$ , %	
Дисперсія $D$ , %	
Середньоквадратичне відхилення $\sigma$ , %	

За значенням статистичних показників а також за значенням інтегральної ймовірності можна судити про відповідність ПЯЕ вимогам ДСТУ EN 50160:2014.